

ANEJO Nº 6. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA

TÍTULO
ESTUDIO INFORMATIVO DE AMPLIACIÓN SUR DE LA LÍNEA 11 DEL METRO DE MADRID

DOCUMENTO
ANEJO Nº 6. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA

CONTROL DE EDICIONES		
VERSIÓN	FECHA	OBSERVACIONES
1.0	10/09/2025	1ª Edición
2.0	17/10/2025	2ª Edición (Tras Supervisión)
3.0		

ANEJO Nº 6. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETO	1
2	METODOLOGÍA Y ANTECEDENTES	2
3	GEOLOGÍA	3
3.1	ENCUADRE REGIONAL	3
3.2	UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS	4
3.2.1	Terciario.....	5
4	GEOMORFOLOGÍA.....	6
5	TECTÓNICA	6
6	SISMICIDAD	6
7	HIDROGEOLOGÍA	7
7.1	GENERALIDADES.....	7
7.2	EL ACUÍFERO DETRÍTICO DE MADRID	7
7.3	DINÁMICA DE FLUJO SUBTERRÁNEO	8
7.4	HIDROGEOLOGÍA DEL TRAZADO.....	8
8	RIESGOS GEOLÓGICOS	9
8.1	AGUAS COLGADAS	9
8.2	RIESGOS ASOCIADOS A LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN ARENA DE MIGA	9
8.3	RELLENOS ANTRÓPICOS	10
8.4	EXPANSIVIDAD	10
8.5	AGRESIVIDAD A LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES	10
9	INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA.....	12
9.1	PROYECTOS Y ESTUDIOS PREVIOS	12

9.2	CAMPAÑA GEOTÉCNICA EJECUTADA.....	13	10.6.4	Determinación de contenido de yeso de los suelos	23
9.2.1	Sondeos mecánicos.....	13	10.6.5	Determinación de materia orgánica	24
9.2.2	Ensayos de penetración dinámica continua	18	10.6.6	Determinación de carbonato cálcico.....	24
9.2.3	Investigación geofísica.....	18	10.6.7	Determinación de la agresividad sobre muestras de agua.....	24
10	ENSAYOS DE LABORATORIO	19	11	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS MATERIALES.....	25
10.1	APERTURA Y DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS.....	20	11.1	RELLENOS ANTRÓPICOS	25
10.2	ENSAYOS DE IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN	20	11.2	TERCIARIO	25
10.2.1	Análisis granulométrico por tamizado	20	11.2.1	Arenas de miga (AM)	25
10.2.2	Determinación de los límites de Atterberg.....	20	11.2.2	Arenas tosquizas (AT).....	34
10.3	ENSAYOS DE ESTADO	20	11.2.3	Toscos arenosos (TA).....	42
10.3.1	Determinación de la humedad natural	20	12	DESCRIPCIÓN GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE LAS ALTERNATIVAS	49
10.3.2	Peso específico aparente seco.....	21	12.1	ALTERNATIVA 1	49
10.4	ENSAYOS DE RESISTENCIA	21	12.2	ALTERNATIVA 2	49
10.4.1	Compresión simple en suelos.....	21	12.3	ALTERNATIVA 3	49
10.4.2	Ensayo de corte directo	21	13	REUTILIZACIÓN DE MATERIALES.....	50
10.4.3	Ensayo triaxial C.U.....	22	14	PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE CÁLCULO.....	51
10.5	ENSAYOS DE APISONADO Y RIGIDEZ.....	22	15	CIMENTACIÓN PROFUNDA DE LAS PANTALLAS.....	52
10.5.1	Ensayo de compactación Proctor Modificado.....	22	15.1	PROFUNDIDAD MÍNIMA DE LA PANTALLA POR EFECTO DEL AGUA	53
10.5.2	CBR (capacidad de soporte de suelos)	22	15.2	DISEÑO DE ANCLAJES	53
10.6	ENSAYOS QUÍMICOS	23	16	PERMEABILIDAD DEL TERRENO	54
10.6.1	Contenido de sulfatos solubles en un suelo	23	17	RESUMEN Y CONCLUSIONES	54
10.6.2	Determinación de la acidez Baumann-Gully.....	23			
10.6.3	Determinación de contenido de sales solubles de los suelos	23			

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 - ESQUEMA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DE MADRID. (GEOLOGÍA DE ESPAÑA. VERA ET AL.,2004)3	
ILUSTRACIÓN 2 - MODELO MORFOLÓGICO Y SEDIMENTARIO DE LA CUENCA DE MADRID. (PEDRAZA, 1996).....3	
ILUSTRACIÓN 3 - ESQUEMA DE UN ABANICO ALUVIAL, CON LA SEGREGACIÓN DE MATERIALES POR TAMAÑOS A LO LARGO DEL MISMO. (MCGOWEN Y GROAT, 1971).....4	
ILUSTRACIÓN 4 - DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE FACIES EN LA CUENCA DE MADRID (DIEZ RUBIO 2010)4	
ILUSTRACIÓN 5 - PRINCIPALES ESTRUCTURAS TECTÓNICAS DE LA CUENCA DE MADRID. (ANDEWEG ET AL., 1999). 6	
ILUSTRACIÓN 6 - CORTE GEOLÓGICO ESQUEMÁTICO DE LA CUENCA DE MADRID (DE VICENTE, 1996; ANDEWEG, 1999)6	
ILUSTRACIÓN 7 - MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA DE ESPAÑA (VERSIÓN REVISADA OCTUBRE 2015); IGN. ...7	
ILUSTRACIÓN 8 - ZONA DE ESTUDIO EN EL ATLAS HIDROGEOLÓGICO DE MADRID (IGME, 1982).....8	
ILUSTRACIÓN 9 - MAQUINARIA UTILIZADA PARA LA EJECUCIÓN DE LOS SONDEOS14	
ILUSTRACIÓN 10 - CROQUIS ENSAYO LEFRANC17	
ILUSTRACIÓN 11 - POSICIÓN DE LOS PERFILES19	
ILUSTRACIÓN 12 - DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA – ARENAS DE MIGA26	
ILUSTRACIÓN 13 - DISTRIBUCIÓN DE LOS GRUPOS GRANULOMÉTRICOS – ARENAS DE MIGA26	
ILUSTRACIÓN 14 - RELACIÓN ENTRE LA GRANULOMETRÍA Y PROFUNDIDAD – ARENAS DE MIGA27	
ILUSTRACIÓN 15 - CARTA DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE – ARENAS DE MIGA27	
ILUSTRACIÓN 16 - GRÁFICO DE RESULTADOS SPT – ARENAS DE MIGA.....29	
ILUSTRACIÓN 17 - RELACIÓN COMPRESIÓN SIMPLE Y FINOS – ARENAS DE MIGA.....30	
ILUSTRACIÓN 18 - RELACIÓN COMPRESIÓN SIMPLE Y DENSIDAD – ARENAS DE MIGA.....30	
ILUSTRACIÓN 19 - DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA – ARENAS TOSQUIZAS.....34	

ILUSTRACIÓN 20 - DISTRIBUCIÓN DE LOS GRUPOS GRANULOMÉTRICOS – ARENAS TOSQUIZAS.....35	
ILUSTRACIÓN 21 - RELACIÓN ENTRE LA GRANULOMETRÍA Y PROFUNDIDAD – ARENAS TOSQUIZAS35	
ILUSTRACIÓN 22 - CARTA DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE – ARENAS TOSQUIZAS36	
ILUSTRACIÓN 23 - GRÁFICO DE RESULTADOS SPT – ARENAS TOSQUIZAS37	
ILUSTRACIÓN 24 - RELACIÓN COMPRESIÓN SIMPLE Y FINOS – ARENAS TOSQUIZAS38	
ILUSTRACIÓN 25 - RELACIÓN COMPRESIÓN SIMPLE Y DENSIDAD – ARENAS TOSQUIZAS38	
ILUSTRACIÓN 26 - DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA – TOSCOS ARENOSOS.....42	
ILUSTRACIÓN 27 - DISTRIBUCIÓN DE LOS GRUPOS GRANULOMÉTRICOS – TOSCOS ARENOSOS.....43	
ILUSTRACIÓN 28 - RELACIÓN ENTRE LA GRANULOMETRÍA Y PROFUNDIDAD – TOSCOS ARENOSOS43	
ILUSTRACIÓN 29 - CARTA DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE – TOSCOS ARENOSOS.....43	
ILUSTRACIÓN 30 - GRÁFICO DE RESULTADOS SPT – TOSCOS ARENOSOS45	
ILUSTRACIÓN 31 - RELACIÓN COMPRESIÓN SIMPLE Y FINOS – TOSCOS ARENOSOS45	
ILUSTRACIÓN 32 - RELACIÓN COMPRESIÓN SIMPLE Y DENSIDAD – TOSCOS ARENOSOS46	
ILUSTRACIÓN 33 - ADHERENCIA LÍMITE EN ARENAS Y GRAVAS54	

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 - Litotipos de la facies Madrid (Escario, 1985) 5	
TABLA 2 - Profundidades de niveles de agua en campañas previas 9	
TABLA 3 - Profundidades de niveles de agua en campaña actual 9	
TABLA 4 - Resultados ensayos contenido en sulfatos..... 10	
TABLA 5 - Resultados ensayos contenido en sulfatos..... 11	
TABLA 6 - Resumen ensayos de hidroquímica en sondeos para determinación de agresividad 11	

TABLA 7 - CLASIFICACIÓN DE LA AGRESIVIDAD QUÍMICA.....	11	TABLA 30 - Resultados ensayos corte directo – Arenas de miga	31
TABLA 8 - Muestras con ataque potencial débil	12	TABLA 31 - Resultados ensayos triaxiales – Arenas de miga.....	31
TABLA 9 - Investigaciones en campañas geotécnicas previas	12	TABLA 32 - Resumen ensayos laboratorio – Arenas de miga.....	32
TABLA 10 - Tabla resumen de sondeos ejecutados.....	14	TABLA 33 - Resultados ensayos granulométricos – Arenas tosquizas	34
TABLA 11 - Coordenadas de sondeos ejecutados	14	TABLA 34 - Resultados ensayos plasticidad – Arenas tosquizas	35
TABLA 12 - Compacidad y consistencia de suelos a partir del SPT	15	TABLA 35 - Resultados ensayos peso específico – Arenas tosquizas	36
TABLA 13 - Resultados de las toma de muestras inalteradas.....	16	TABLA 36 - Resultados ensayos humedad natural – Arenas tosquizas	36
TABLA 14 - Resultados de las toma de testigo de sondeo.....	16	TABLA 37 - Resultados ensayos SPT – Arenas tosquizas.....	37
TABLA 15 - Profundidades de las toma de muestra de agua.....	17	TABLA 38 - Resultados ensayos MI – Arenas tosquizas.....	37
TABLA 16 - Ensayos Lefranc realizados.....	18	TABLA 39 - Resultados ensayos compresión simple – Arenas tosquizas	38
TABLA 17 - Correlación compacidad y consistencia de suelos con resultados DPSH	18	TABLA 40 - Resultados ensayos corte directo – Arenas tosquizas.....	38
TABLA 18 - Tabla resumen de ensayos de penetración dinámica ejecutados	18	TABLA 41 - Resultados ensayos triaxiales – Arenas tosquizas	39
TABLA 19 - Coordenadas del punto medio aproximado de cada tomografía eléctrica	19	TABLA 42 - Resumen ensayos laboratorio – Arenas tosquizas	40
TABLA 20 - Tabla resumen de ensayos de laboratorio	19	TABLA 43 - Resultados ensayos granulométricos – Toscos arenosos	42
TABLA 21 - Consistencia de suelos cohesivos en función de la resistencia a compresión simple.....	21	TABLA 44 - Resultados ensayos plasticidad – Toscos arenosos.....	43
TABLA 22 - Resultados ensayos Proctor Modificado e Índice CBR.....	23	TABLA 45 - Resultados ensayos peso específico – Toscos arenosos.....	44
TABLA 23 - Resultados ensayos granulométricos – Arenas de miga	25	TABLA 46 - Resultados ensayos humedad natural – Toscos arenosos.....	44
TABLA 24 - Resultados ensayos plasticidad – Arenas de miga	27	TABLA 47 - Resultados ensayos SPT – Toscos arenosos.....	44
TABLA 25 - Resultados ensayos peso específico – Arenas de miga.....	28	TABLA 48 - Resultados ensayos compresión simple – Toscos arenosos.....	45
TABLA 26 - Resultados ensayos humedad natural – Arenas de miga	28	TABLA 49 - Resultados ensayos corte directo – Toscos arenosos	46
TABLA 27 - Resultados ensayos SPT – Arenas de miga	28	TABLA 50 - Resultados ensayos triaxiales – Toscos arenosos.....	46
TABLA 28 - Resultados ensayos MI – Arenas de miga	29	TABLA 51 - Resumen ensayos laboratorio – Toscos arenosos	47
TABLA 29 - Resultados ensayos compresión simple – Arenas de miga.....	30	TABLA 52 - Resultados ensayos PG-3 – Arenas de miga.....	50

TABLA 53 - Resultados ensayos PG-3 – Arenas tosquizas.....	50	APÉNDICE 7. CAMPAÑA GEOTÉCNICA: GEOFÍSICA.....	69
TABLA 54 - Resultados ensayos PG-3 – Toscos arenosos.....	50		
TABLA 55 - Resultados ensayos contenido en sulfatos y carbonatos.....	50		
TABLA 56 - Valores medios del peso específico y humedad natural.....	51		
TABLA 57 - Valores de los ensayos SPT y compresión simple.....	51		
TABLA 58 - Valores de los ensayos de corte directo y triaxiales.....	51		
TABLA 59 - Parámetros geotécnicos para los proyectos de ampliación del Metro de Madrid (1999-2003)	51		
TABLA 60 - Parámetros geotécnicos propuestos.....	52		
TABLA 61 - Valores de la tensión admisible en anclajes.....	54		
TABLA 62 - Valores característicos de la permeabilidad.....	54		
TABLA 63 - Litotipos de la facies Madrid (Escario, 1985).....	55		
TABLA 64 - Profundidades de niveles de agua en campaña actual.....	55		
TABLA 65 - Parámetros geotécnicos propuestos.....	55		

APÉNDICES

APÉNDICE 1. PLANTA GEOLÓGICA 1:2000.....	57
APÉNDICE 2. PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE LAS ALTERNATIVAS EH 1:2000 EV 1:200 ...	59
APÉNDICE 3. CAMPAÑA GEOTÉCNICA: REGISTRO DE SONDEOS.....	61
APÉNDICE 4. CAMPAÑA GEOTÉCNICA: REGISTRO ENSAYOS DE PENETRACIÓN DINÁMICA CONTINUA.....	63
APÉNDICE 5. CAMPAÑA GEOTÉCNICA: REGISTRO ENSAYOS LEFRANC.....	65
APÉNDICE 6. CAMPAÑA GEOTÉCNICA: REGISTRO ENSAYOS DE LABORATORIO.....	67

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETO

El presente anejo recoge el estudio geológico geotécnico para el contrato de *REDACCIÓN DEL PROYECTO DE AMPLIACIÓN SUR DE LA LÍNEA 11 DEL METRO DE MADRID*, cuyo adjudicatario (Orden del Consejero de Vivienda, Transportes e Infraestructuras de fecha 11 de marzo de 2024) es la UTE AMPLIACIÓN SUR LÍNEA 11 METRO, formada por las empresas PROES CONSULTORES, S.A. – BAC ENGINEERING CONSULTANCY GROUP, S.L.U, siendo el promotor la Dirección General de Infraestructuras de Transporte Colectivo de la Comunidad de Madrid.

El objeto del contrato consiste en la redacción del Proyecto Constructivo correspondiente a la ampliación sur de la línea 11 del Metro de Madrid, desde la estación de La Fortuna hasta la línea 10 de Metro de Madrid.

El contrato se encuentra en la Fase 1 DOCUMENTACIÓN PARA LA TRAMITACIÓN AMBIENTAL, en la cual se realizan trabajos iniciales, se efectúa una obtención de datos básicos, y se definen diversas alternativas para finalmente seleccionar una de entre todas ellas.

Dentro de la fase de Estudio Informativo, en este anejo se describen las características geológicas e hidrogeológicas y se analizan las características geotécnicas de las unidades reconocidas en las distintas alternativas propuestas.

En este momento se han planteado 3 alternativas de trazado con distintas particularidades cada una de ellas; partiendo todas ellas desde el actual fondo de saco de Línea 11 del Metro de Madrid.

2 METODOLOGÍA Y ANTECEDENTES

Para la elaboración de este anejo se han realizado las siguientes tareas:

I. Recopilación y análisis de información geológico-geotécnica existente. En cuanto a estudios geotécnicos en la zona, se cuenta con la información que se enumera a continuación, que ha sido tenido en cuenta en la elaboración de los perfiles.

- Proyecto de construcción de la infraestructura de la prolongación de la línea 10 del Metro de Madrid a Metrosur. Tramo 1 A: Colonia jardín - Cuatro vientos (2000).
- Informe geológico y geotécnico del Proyecto de construcción de la infraestructura de prolongación de la línea 11 del Metro de Madrid al barrio de La Fortuna (2008).
- Proyecto modificado Nº 1 del proyecto de construcción de la infraestructura de prolongación de la Línea 11 del Metro de Madrid al Barrio de la Fortuna (2009).
- Proyecto de Construcción de la Ampliación de las Cocheras de la Línea 10 del Metro de Madrid (2005).

Por otra parte, entre la bibliografía general regional, puede citarse la siguiente:

- ITGE (1989) “Mapa Geológico de España”. Serie Magna. Escala 1:50.000. Hoja nº 559 (Madrid).
- ITGE (1972) “Mapa Geotécnico General”. Escala 1:200.000. Hoja 5-6 nº 45 (Madrid).
- ITGE. (1997) “Mapa Hidrogeológico de España”. Escala 1:200.000. Hoja 5-6 nº 45 (Madrid).
- Página web de la Confederación Hidrográfica del Tajo y de la Comunidad de Madrid.
- Escario V. (1985) “Síntesis Geotécnica de los suelos de Madrid y su Alfoz”. MTC, D.G. Infraestructuras del Transporte.
- Vera J.A. (Editor) (2004) “Geología de España” Sociedad Geológica de España.
- De la Fuente,P. y Oteo, C (1984) “Deformabilidad de los suelos tosquizos de Madrid”. CEDEX, Cuadernos de investigación. Monografía nº11.
- Rodriguez Ortiz, J.Mª; (1992) “Túneles a cielo abierto”.. Cursos sobre “Túneles urbanos y

suburbanos”. Tomo I. Capítulo 3. CEDEX, Madrid.

- De Melis, M.; Oteo, C. y Rodriguez Ortiz, J.Mª (2000) “Estrategia geotécnica aplicada a la Ampliación del Metro de Madrid 1995-99”. Capítulo del Libro Homenaje a J.A Jiménez Salas, editado por CEDEX y SEMSIG, Madrid.
- Rodriguez Ortiz, J.Mª (2000) “Propiedades geotécnicas de los suelos de Madrid”. R.O.P nº 3405, diciembre 2000.
- Oteo, C; Rodriguez Ortiz, J.Mª. y Mendaña Saavedra, F. (2003) “Sobre los sistemas y parámetros geotécnicos de diseño en la Ampliación del Metro de Madrid”. R.O:P nº 3429, enero 2003.
- De la Fuente Martín, P; Oteo, C (1984): “Estudio de la deformabilidad de los suelos arcillosos de Madrid”.

II. Reconocimientos de campo y cartografía geológica.

Para la planificación y ejecución de la campaña geotécnica, se realiza una inspección in situ de la zona, para la comprobación de accesos, solicitudes de permisos, etc.

III. Planteamiento y ejecución de la campaña geotécnica.

La campaña geotécnica ha consistido en la ejecución de sondeos mecánicos a rotación con ensayos y toma de muestras in situ, ensayos de penetración dinámica continua, y exploración geofísica.

IV. Ensayos de laboratorio sobre las muestras obtenidas en los sondeos.

V. Análisis de la información.

Elaboración de perfiles geotécnicos de las alternativas y caracterización geotécnica de los materiales.

3 GEOLOGÍA

3.1 ENCUADRE REGIONAL

Desde el punto de vista geológico, Madrid y su entorno se sitúan en la Cuenca Terciaria del Tajo, también denominada Cuenca de Madrid. Ésta es una cuenca intramontañosa de contorno triangular, limitada por zonas elevadas mediante fallas inversas, geológicamente estructuras compresivas pop-up, de naturaleza fundamentalmente granítica y metamórfica, como son el Sistema Central al NO y los Montes de Toledo al S; hacia el este cierran la cuenca los relieves de la Cordillera Ibérica y Sierra de Altomira, con rocas mesozoicas (calizas, margas, areniscas, etc).

La formación de los relieves y, consecuentemente, el relleno sedimentario de la cuenca a partir de la erosión de éstos se inicia en el Oligoceno, teniendo su mayor desarrollo en el Mioceno, llegándose a la colmatación de la cuenca en el Plioceno. El espesor de sedimentos en la cuenca llega a superar los 2.000 m.



ILUSTRACIÓN 1 - ESQUEMA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DE MADRID. (GEOLOGÍA DE ESPAÑA. VERA ET AL., 2004)

La ilustración anterior indica la situación de la cuenca de Madrid en la Península Ibérica y representa un mapa geológico simplificado. Las flechas indican la dirección de los aportes de los sistemas de abanicos aluviales. La línea de puntos corresponde al límite paleogeográfico del contacto de las facies detríticas de borde con las facies de orla lacustre en el Aragoniense Medio y Superior (Unidad Intermedia) según Calvo et al. (1989a).

Como es habitual en las cuencas intramontañosas, el relleno en las mismas tiene lugar mediante abanicos aluviales coalescentes, que rodean una zona endorreica. En estos sistemas de sedimentación los depósitos se organizan mediante un esquema proximal-distal, situándose depósitos detríticos gruesos (gravas, areniscas) junto a las zonas de borde de la cuenca, detríticos finos (arcillas) en las zonas intermedias y depósitos lacustres con formación de sales y carbonatos en las zonas centrales, sucediéndose espacialmente mediante cambios de facies.

Como es también habitual en estas cuencas, los diferentes ciclos sedimentarios son sucesivamente más extensivos, por lo que la sucesión de depósitos proximales-distales puede verse tanto en la horizontal como en la vertical, disponiéndose unidades proximales suprayacentes a unidades más distales.

La naturaleza fundamentalmente granítica de las áreas fuente hace que en la zona de Madrid y el extremo occidental de la cuenca predominen las arcosas, areniscas feldespáticas, en los depósitos proximales. La alteración de estos silicatos, y la posterior sedimentación lacustre de los productos de alteración en las zonas centrales de la cuenca, da lugar a depósitos de sílex y neoformación de arcillas (sepiolita, montmorillonita...). Por otro lado, el borde oriental de la cuenca proporciona carbonatos y sales que dan lugar a depósitos salinos (yesos fundamentalmente) y carbonáticos (margas y calizas) también en las zonas centrales de la cuenca.

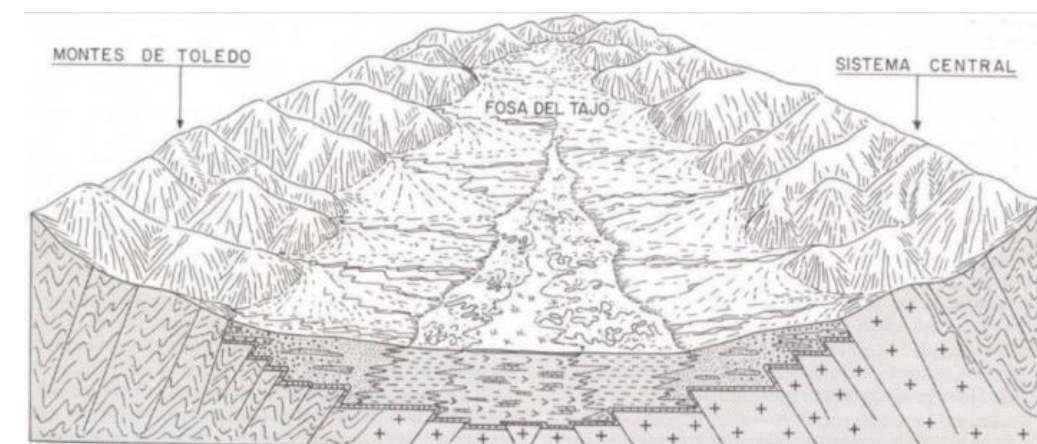


ILUSTRACIÓN 2 - MODELO MORFOLÓGICO Y SEDIMENTARIO DE LA CUENCA DE MADRID. (PEDRAZA, 1996)

Como ya se ha indicado, la Cuenca de Madrid es una cuenca intramontañosa endorreica donde los sedimentos se distribuyen con un esquema proximal-distal. Como resultado de esta disposición, se genera una distribución de facies sedimentarias en función de proximidad o lejanía al área fuente, depositándose progresivamente los sedimentos más finos hacia las zonas más interiores de la cuenca, terminando con los evaporíticos en el centro de ésta. De esta manera, en los depósitos miocenos de la Cuenca de Madrid se puede establecer una división de facies, distinguiéndose tres tipos: facies marginales de cuenca (o de borde), de transición (o intermedias) y de interior de cuenca (o centrales). A estos depósitos se superponen los depósitos fluviales correspondientes al Plioceno y Cuaternario.

La separación entre unas y otras litofacies puede hacerse a grandes rasgos dentro de la Cuenca del Tajo, de forma paralela a los bordes de la cuenca. Así, se reconocen las facies de borde hacia el noroeste y las centrales hacia el Sudeste de la capital. No obstante, son frecuentes cambios de facies entre depósitos dentro de un mismo plano, debido al carácter de la sedimentación en abanicos aluviales, en los que los depósitos se segregan por tamaños entre la cabecera y el pie del abanico y en los que, además, se superponen lateralmente abanicos adyacentes.

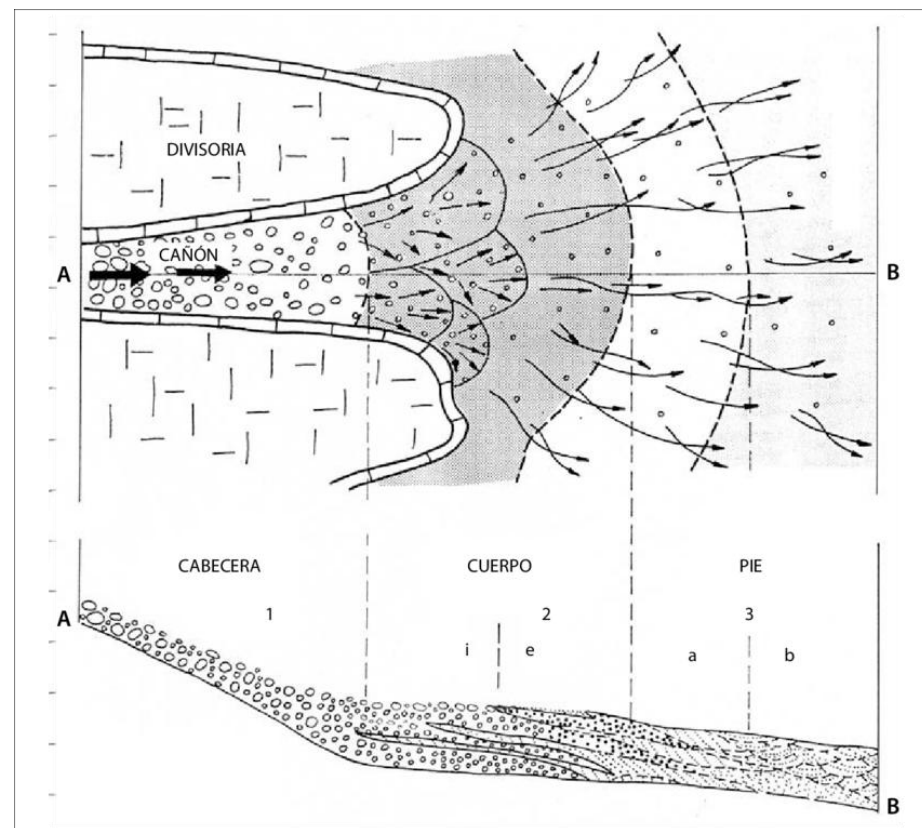


ILUSTRACIÓN 3 - ESQUEMA DE UN ABANICO ALUVIAL, CON LA SEGREGACIÓN DE MATERIALES POR TAMAÑOS A LO LARGO DEL MISMO. (MCGOWEN Y GROAT, 1971)

Planta esquemática y sección de un abanico aluvial funcional. Las flechas (vectores) indican la intensidad relativa de los procesos fluviales (MacGowen y Groat, 1971): 1) cabecera (gravas masivas y muy gruesas); 2) el cuerpo muestra alternancia de gravas (predominantes en la zona interna (i)) y arenas (más evidentes en la zona externa (e)); 3) el pie muestra estructuras tractivas de estratificación cruzada curvada en la zona interna (a) y estratificación cruzada tabular (b).

3.2 UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS

Dentro del entorno de Madrid se pueden diferenciar cuatro conjuntos de depósitos sedimentarios o facies:

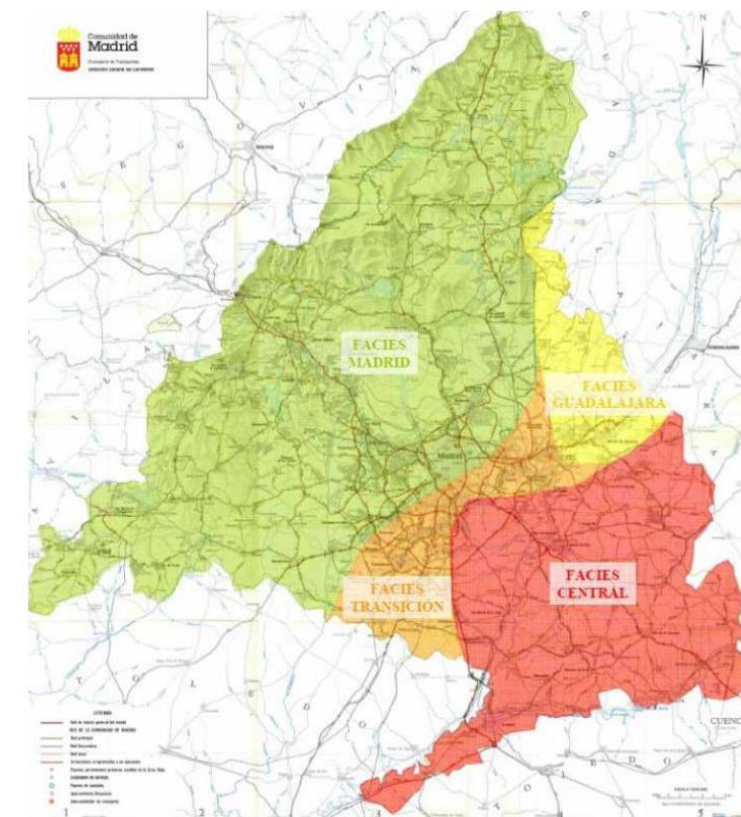


ILUSTRACIÓN 4 - DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE FACIES EN LA CUENCA DE MADRID (DIEZ RUBIO 2010)

- Facies Madrid, caracterizada por areniscas feldespáticas (arcosas) que se intercalan con arcillas, que se hacen predominantes en zonas distales.
- Facies Guadalajara, similares a las anteriores si bien con presencia de areniscas líticas, como corresponde a áreas fuente con pizarras y esquistos.
- Facies de transición, con predominio de arcillas, tanto detríticas como autigénicas, así como de margas.

- Facies central, caracterizada por depósitos evaporíticos formado en un ambiente lacustre restringido. Está compuesta por margas yesíferas negras, yesos masivos y calizas.

Suprayacentes se encuentran formaciones superficiales pliocenas y cuaternarias representadas principalmente por depósitos aluviales vinculados a la red fluvial, como las terrazas del Jarama o arroyos como el de Valdebebas. También se encuentran importantes rellenos debido a la actividad urbanística de la ciudad.

3.2.1 Terciario

En los materiales del Terciario localizados en el área de Madrid y su alfoz, que constituyen las facies Madrid, se diferencian varias unidades litoestratigráficas con sentido geotécnico. El criterio para diferenciarlas es su contenido en finos, concretamente el porcentaje de material pasante por el tamiz # 0,08 mm, que incluye arenas y limos (según la nomenclatura más utilizada de V. Escario, P. de la Fuente, etc.). Estos son:

TABLA 1 - LITOTIPOS DE LA FACIES MADRID (ESCARIO, 1985)

% PASA TAMIZ Nº 200	DENOMINACIÓN
T200 < 25	Arenas de miga
25 < T200 < 40	Arenas tosquizas
40 < T200 < 60	Tosco arenoso
T200 > 60	Tosco

ARENA DE MIGA: Este litotipo incluye las arcosas superiores del Aragoniense Superior. Se corresponden con depósitos detríticos caracterizados por su proporción de finos limo-arcillosos inferior al 25%, con arenas y areniscas arcóscas con cantos aislados y lentejones de cantos redondeados y alterados de cuarcita, gneis y granito, apareciendo intercalaciones e indentaciones de conjuntos arcillosos compactos, de índole diversa, aunque con predominio de los filosilicatos procedentes de la alteración de los feldespatos. Suelen presentar coloración de blanquecina a pardo-anaranjado, incluso amarillos y ocre.

Es frecuente la alternancia de tramos de granulometría más gruesa con otros más arcillosos e incluso calcáreos, aunque siempre muy subordinados, lo cual favorece la aparición de acuíferos colgados de extensión limitada, aislados por niveles arcillosos impermeables. Estas características granulométricas les confieren una elevada permeabilidad, lo cual facilita la formación de encostramientos y exudaciones calcáreas por la removilización de las sales disueltas.

La transición de arena de miga a materiales con mayor contenido en finos se produce de forma gradual, observándose en estas transiciones un aumento de la presencia de intercalaciones arcillosas.

ARENA TOSQUIZA: Este litotipo forma parte de la transición entre la arena de miga y el tosco. Son depósitos con geometría lenticular y con presencia de arenas arcóscas de grano medio a grueso con mayor contenido de niveles arcillosos (entre el 25 y 40%), en comparación con la arena de miga, presentando también secuencias granodecrescentes. Suelen presentar coloraciones claras a pardo-anaranjadas, con tonos verdosos a marrones en los niveles más arcillosos del techo de las secuencias.

TOSCO-ARENOSO: Arena limo-arcillosa o arcilla limo-arenosa en que el porcentaje de finos varía entre el 40 y el 65%.

Al igual que la arena tosquiza se trata de un litotipo intermedio entre las facies de arena de miga y las facies tosco. Son arenas limo-arcillosa o arcillas limo-arenosas con porcentaje de finos variable entre el 40 y el 65%. Se presentan frecuentemente como niveles centimétricos alternantes y laminados. Generalmente, se trata de materiales de plasticidad media. Son prácticamente impermeables y suelen presentar alto contenido de humedad.

El origen de este tipo de depósitos se relaciona con zonas más distales de los abanicos aluviales que las facies arenosas con predominio de la inundación sobre las corrientes tractivas, ya en claro tránsito hacia las denominadas facies intermedias.

TOSCO: Formado por arcillas y limos de coloración ocre y marrón, de baja plasticidad, aunque en ocasiones puede ser alta. El porcentaje de finos superior al 65%. Su estructura interna es masiva, con carácter lenticular e intercalaciones subhorizontales de composición variable. Su consistencia es dura. Al igual que el tosco arenoso, intercala niveles centimétricos de arena tosquiza y tosco arenoso de grano fino, que le confieren un laminado característico.

Su origen se asocia a zonas distales de abanicos aluviales en las que se produce casi exclusivamente sedimentación por inundación y decantación, con escasos episodios de corrientes tractivas de baja energía.

También puede denominarse tosco arcilloso a los materiales con más del 85% de finos.

4 GEOMORFOLOGÍA

Los principales rasgos morfológicos de la Cuenca de Madrid están condicionados por la naturaleza litológica y la estructura de su relleno mioceno, así como los procesos de erosión y acumulación acaecidos durante el plioceno y cuaternario. En detalle, la zona de estudio se sitúa en la cuenca hidrográfica del Jarama dentro del final de su curso medio. El curso fluvial del Río Jarama se genera como resultado de su incisión sobre las altiplanicies o divisorias conocidas también como “superficie de madrid” (riba 1957), desarrolladas sobre las arenas arcósicas.

5 TECTÓNICA

La Cuenca de Madrid es una de las grandes áreas subsidentes intracontinentales, de edad Terciaria, que ocupan en el interior de la Península Ibérica. Según Vegas y Banda (1982), no representa una verdadera fosa tectónica, ya que su desarrollo coincide con una deformación compresiva global de la Península Ibérica durante el Terciario, cuyo resultado es la estructuración de relieves positivos, como el Sistema Central, y zonas subsidentes como la la Cuenca de Madrid.

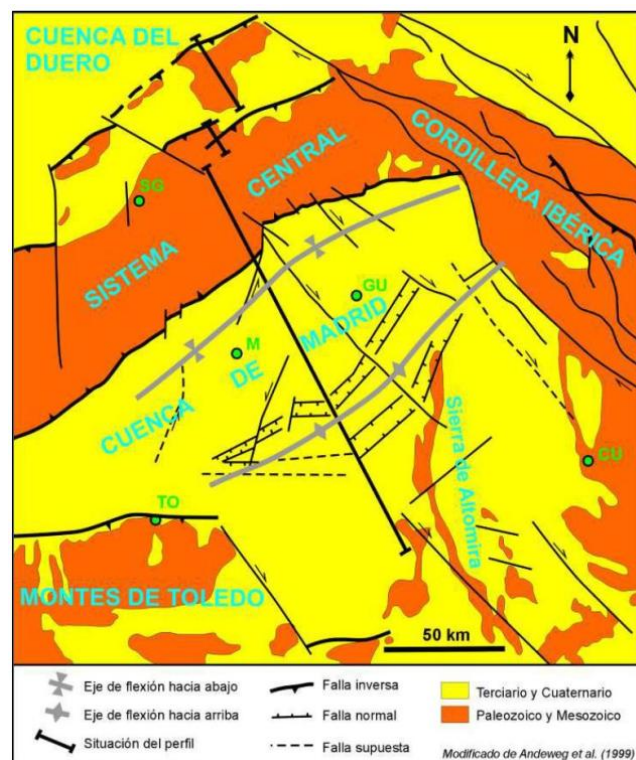


ILUSTRACIÓN 5 - PRINCIPALES ESTRUCTURAS TECTÓNICAS DE LA CUENCA DE MADRID. (ANDEWEG ET AL., 1999).

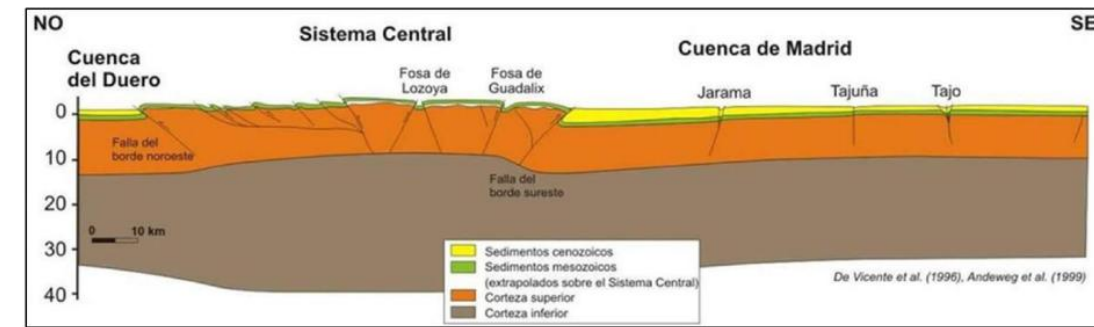


ILUSTRACIÓN 6 - CORTE GEOLÓGICO ESQUEMÁTICO DE LA CUENCA DE MADRID (DE VICENTE, 1996; ANDEWEG, 1999)

Dentro de la cuenca, el área de Madrid está situada cerca de su borde septentrional, donde el Sistema Central aparece como una línea de mayor actividad frente a los esfuerzos tectónicos que produjeron la deformación causante de la elevación de dicho sistema y la subsidencia de la cuenca.

Los relieves son consecuencia de la reactivación durante la orogenia Alpina de fracturas posthercínicas del zócalo, que condujeron a una dinámica de bloques con sedimentación en la cuenca terciaria, que controló la distribución de las facies.

La actividad tectosedimentaria se refleja en el control estructural de los principales corredores, principalmente según direcciones NE-SO y su conjugada o complementaria NO-SE, que corresponden a fallas de desgarre posthercínicas.

Debido a la naturaleza de los sedimentos detríticos del área de Madrid, esta tectónica frágil no se manifiesta en superficie, aunque sí se refleja en la jerarquización de la red fluvial. Además de esto, la disimetría de los valles del Jarama y sus afluentes puede quedar explicada por las suaves inclinaciones en los materiales terciarios.

6 SISMICIDAD

Para la evaluación y prevención del riesgo sísmico se ha seguido lo indicado en el Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. De acuerdo con este código, el tipo de terreno presente en el proyecto es el Tipo B, con predominio de suelos granulares densos o suelos cohesivos duros o presencia de capas delgadas de suelos granulares sueltos o cohesivos blandos.

En cuanto a su ubicación en el mapa de regiones sísmicas, la aceleración horizontal a_{gR} es

inferior a 0.04, en toda la zona. Estos valores de aceleración son acordes a lo indicado en el Mapa de Peligrosidad Sísmica de España (versión revisada octubre 2015), del IGN, donde se muestra lo siguiente para la zona de estudio:

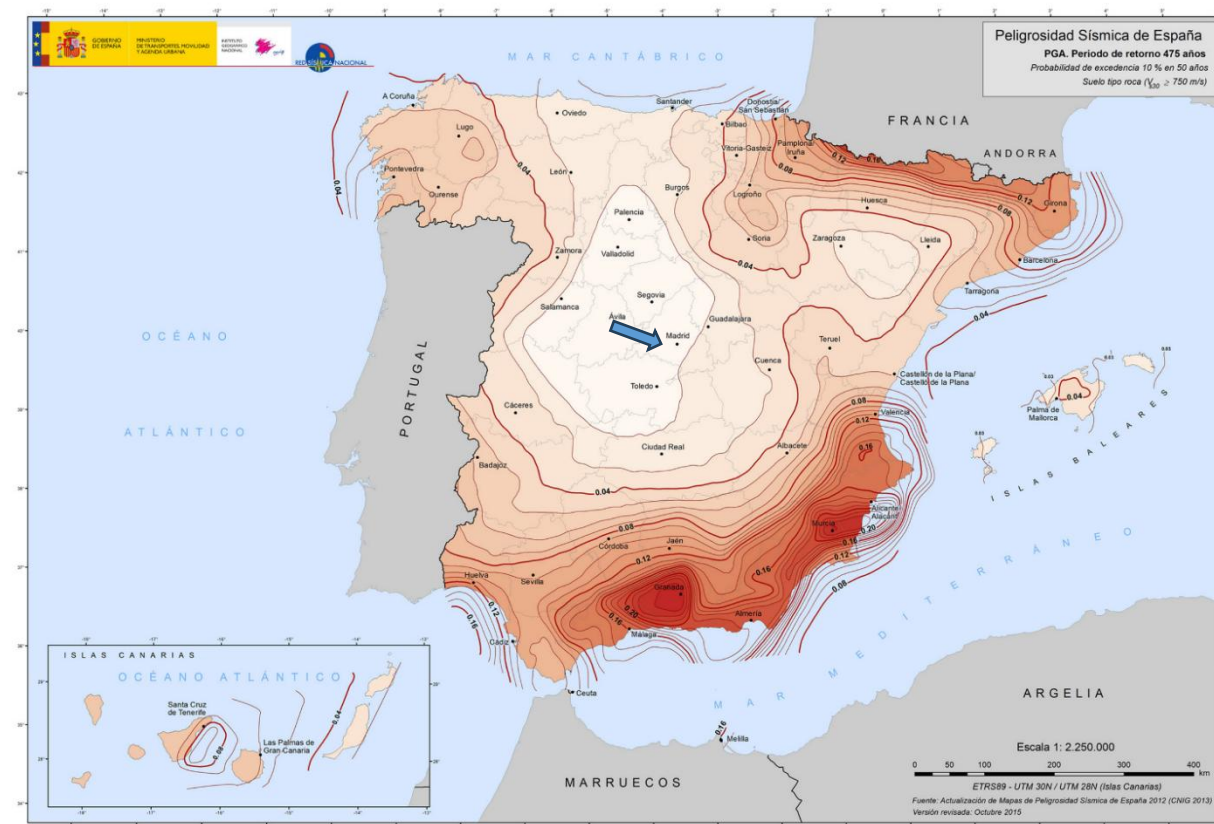


ILUSTRACIÓN 7 - MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA DE ESPAÑA (VERSIÓN REVISADA OCTUBRE 2015); IGN.

Por tanto, se trata de una zona en la que no es obligatoria la aplicación de la normativa sismorresistente, al encontrarse por debajo del valor requerido (0,04g) según ésta.

7 HIDROGEOLOGÍA

7.1 GENERALIDADES

Desde el punto de vista hidrogeológico, Madrid se localiza dentro de la Cuenca del río Tajo y, dentro de ésta, sobre el denominado acuífero 14, Terciario Detrítico de Madrid-Toledo-Cáceres, limitado, a grandes rasgos, por la Sierra de Guadarrama, el río Tiétar, las estribaciones de los Montes de Toledo y las calizas del Páramo.

Dentro de la cuenca se pueden diferenciar varias Masas de Agua Subterránea, encontrándose la zona de estudio sobre la 3.05d, Madrid Manzanares-Jarama.

De forma regional podemos definir la geometría del acuífero como un conjunto de lentejones areno-arcillosos de diverso tamaño, distribuidos aleatoriamente en una matriz arcillosa, funcionando a nivel regional como un acuífero heterogéneo y anisótropo, que se recarga por infiltración del agua de lluvia en las zonas topográficamente más elevadas (interfluvios) y se descarga fundamentalmente en las más bajas (valles fluviales). Esto condiciona que, como consecuencia del modelo de flujo regional, los niveles piezométricos varían con la profundidad. Así en los interfluvios el potencial hidráulico disminuye al aumentar la profundidad, es decir, los pozos más profundos tienen sus niveles estáticos más profundos, mientras en las zonas de descarga, el potencial hidráulico aumenta con la profundidad.

Las características químicas de las aguas están muy influenciadas por el sistema de flujo y por la litología del acuífero. En zonas de recarga, durante el paso del agua de lluvia que se infiltra por la zona no saturada se produce la hidrólisis de los silicatos, principalmente, haciendo que aumente su contenido en SiO_2 , en elementos alcalinos o alcalinotérreos, dándole una facies química tipo bicarbonatadas cálcicas o magnésicas.

7.2 EL ACUÍFERO DETRÍTICO DE MADRID

Como se ha indicado, puede considerarse como un acuífero único, libre, complejo, heterogéneo y anisótropo. La recarga del acuífero se produce principalmente por la infiltración del agua de lluvia caída directamente sobre los materiales terciarios. Esta infiltración tiene lugar en los interfluvios. La descarga se realiza fundamentalmente en los valles, con sistemas de flujo locales, intermedios y regionales.

En general, la permeabilidad horizontal media de los sedimentos terciarios detríticos es baja (0,05

a 0,20 m/día) y la permeabilidad vertical media unas cien veces menor. En estas condiciones, los tiempos de residencia de las aguas subterráneas son largos, pudiendo ser inferiores a cinco o diez mil años para las aguas que circulan solo en la zona superior del acuífero, y alcanzando los cientos de miles de años si las trayectorias corresponden a flujos intermedios o regionales. Esta circunstancia determina que en las zonas de descarga puedan confluir aguas con tiempos de residencia en el acuífero muy diferentes lo que explicaría la existencia de zonas con aguas de características geoquímicas anómalas que corresponden a tiempos de residencia muy altos, debido a los procesos de cambio iónico en arcillas que modifican la química de las aguas.

7.3 DINÁMICA DE FLUJO SUBTERRÁNEO

Las unidades litológicas granulares superiores de las facies Madrid, compuestas por las arenas de miga y tosquizas, constituyen en principio un acuífero libre de potencia variable. No obstante, la frecuencia de intercalaciones arcillosas hace que se comporte en gran medida como un acuífero multicapa, con niveles de diferente permeabilidad intercalados entre sí, lo que da lugar a horizontes saturados confinados que forman bolsas de agua y niveles colgados.

Las unidades arcillosas, tosco arenoso y tosco, infrayacentes a anteriores, se comportan como un acuitardo, ya que no suponen un límite impermeable estricto. El grado de saturación de estos materiales suele ser medio-bajo y, aunque ocasionalmente pueda ser alto, no presentan carga hidráulica. También dentro de las unidades tosquizas es frecuente encontrar litologías granulares más gruesas, correspondientes a lentejones arenosos. Estas unidades granulares inferiores son acuíferos confinados que, generalmente, presentan carga artesisiana debido al peso de los materiales suprayacentes y al límite casi impermeable que suponen los materiales tosquizos.

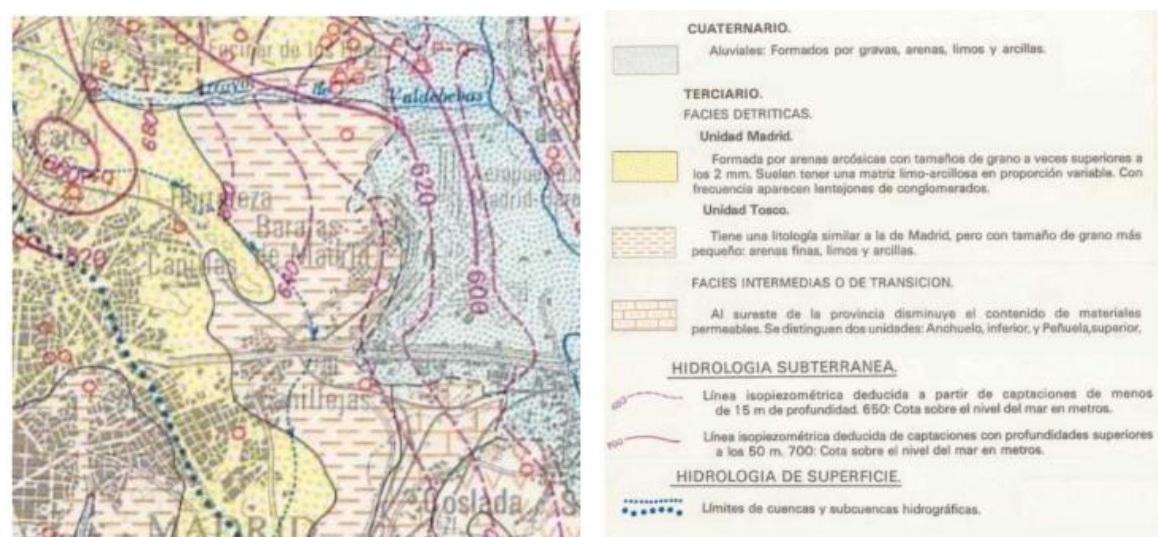


ILUSTRACIÓN 8 - ZONA DE ESTUDIO EN EL ATLAS HIDROGEOLOGICO DE MADRID (IGME, 1982)

Respecto a las formaciones superficiales, los rellenos antrópicos suelen presentarse secos, aunque pueden saturarse de forma esporádica estacionalmente. Los depósitos aluviales suelen presentar asociado un nivel freático de recarga superficial, principalmente.

Los acuíferos cuaternarios están ligados al curso original de estos arroyos, con niveles de permeabilidad algo superiores a los materiales terciarios, y pueden considerarse como acuíferos libres que se recargan a partir de la infiltración directa de lluvia y de los materiales terciarios infrayacentes. Normalmente, se encuentran secos, aunque la presencia de agua puede ser esporádica en los niveles más granulares y en el contacto con depósitos miocenos, asociados a los periodos de intensa precipitación o a pérdidas sufridas en colectores o canalizaciones.

De este modo, el acuífero de Madrid dentro de ser un acuífero multicapa tiene o presenta ciertas peculiaridades en cuanto a su funcionamiento. En primer lugar, la consideración regional de acuífero en el que existe un flujo de agua subterráneo no es del todo aplicable a las formaciones de las facies Madrid. Las facies detríticas miocenas existentes en el entorno de Madrid se caracterizan por su escasa continuidad lateral que hace imposible el seguimiento de las capas o estratos que continuamente se están acuñando lateralmente y cambiando sus características.

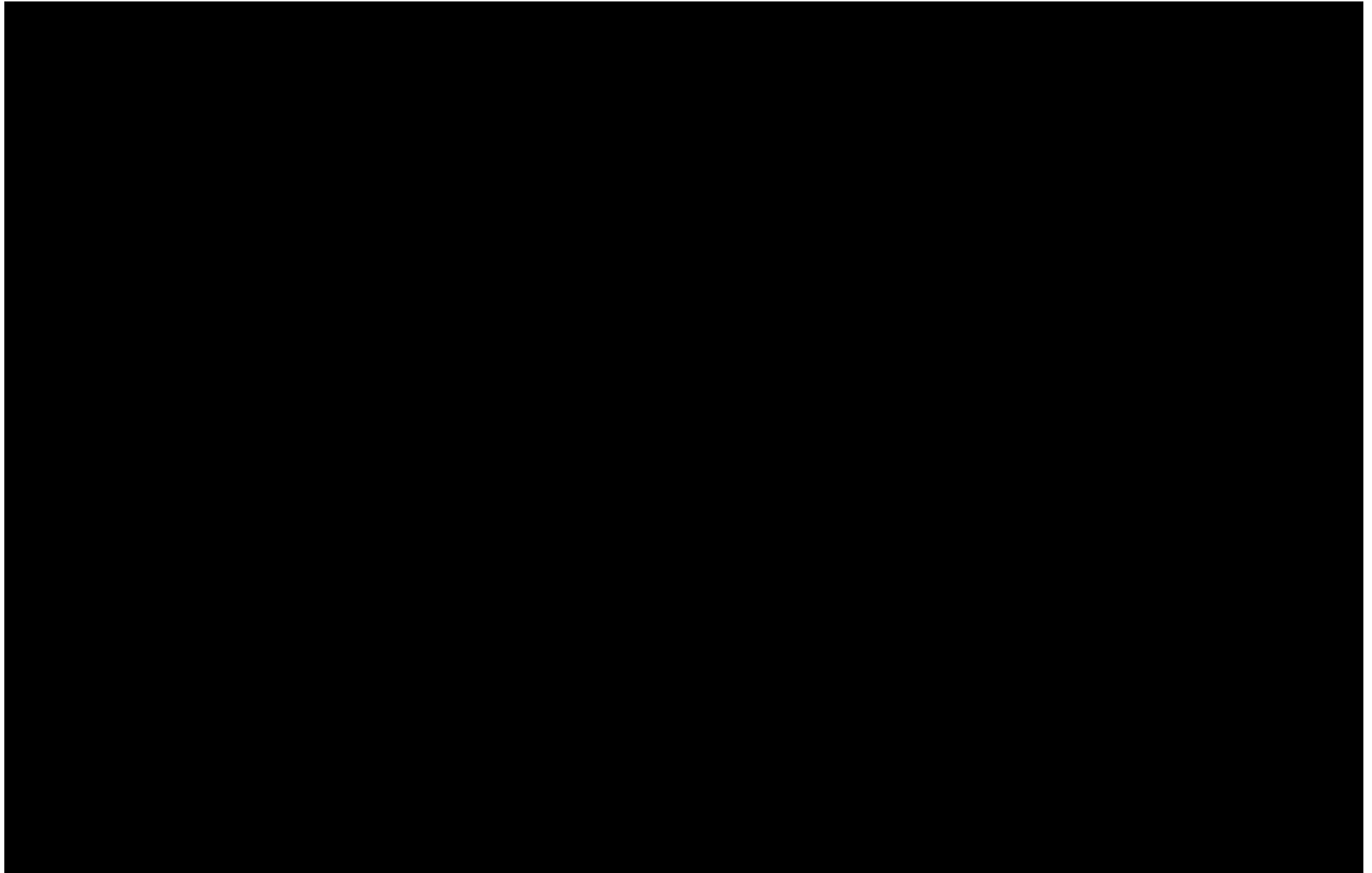
Hidrogeológicamente esto tiene una gran relevancia en el conjunto de las facies detríticas ya que las capas permeables de arena tosquiza o arena de miga tienen una distribución discontinua tanto en profundidad como lateralmente. El comportamiento hidrogeológico entre capas es por tanto individual y aislado de manera que pueden existir niveles freáticos colgados a distintas cotas en puntos muy próximos.

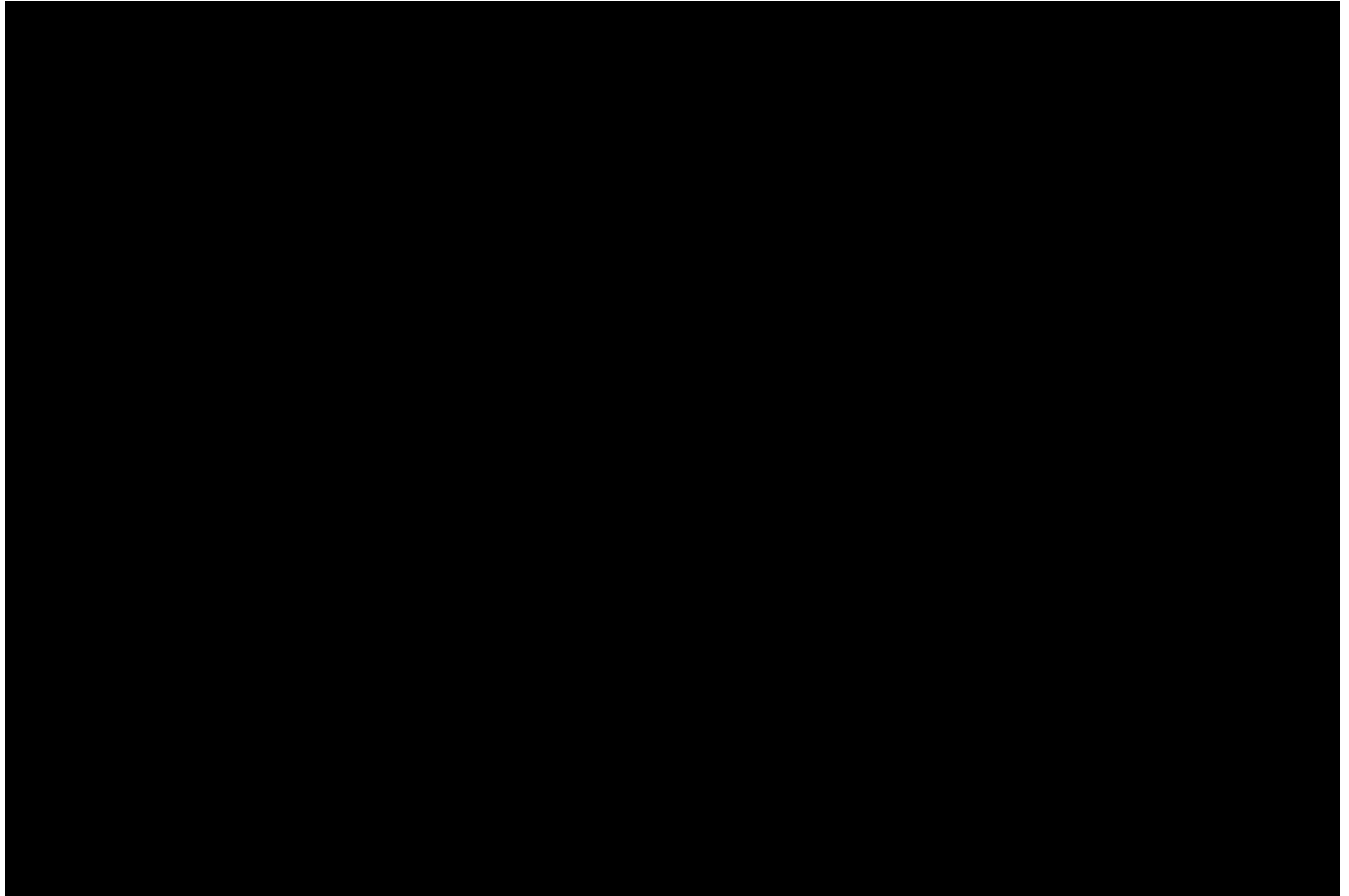
Esta circunstancia está ampliamente comprobada tanto tradicionalmente como en el desarrollo de las obras del Metro de Madrid y condiciona la tipología de las soluciones en algunos casos.

El agua freática existente en las capas detríticas es en buena parte fósil, no existiendo recargas significativas del acuífero y manteniendo éste el nivel dentro de los cuerpos arenosos. En los casos más superficiales en los que las arenas están aflorantes se recargan por escorrentía de manera muy puntual pasando a ser un acuífero superficial.

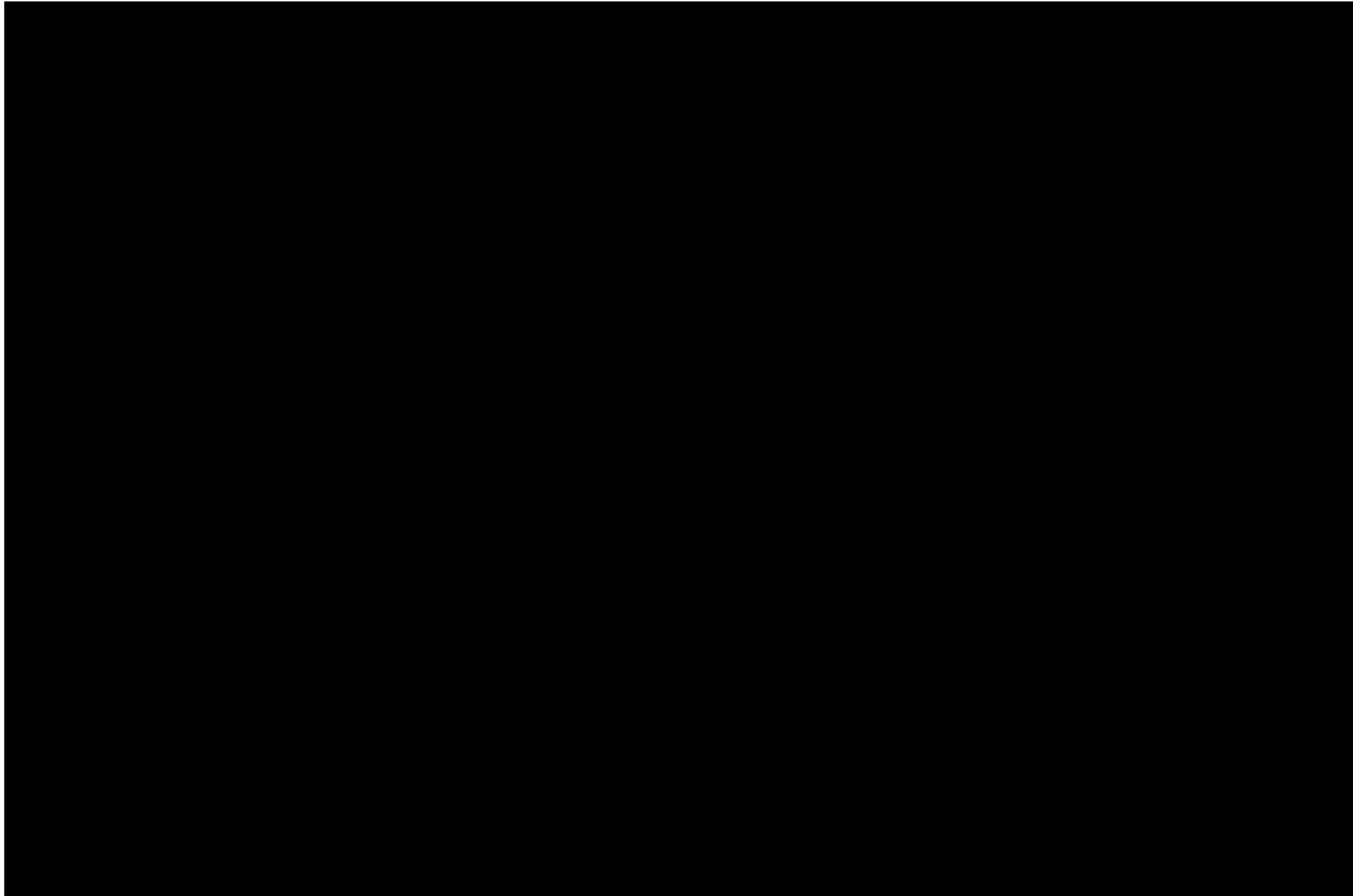
7.4 HIDROGEOLOGÍA DEL TRAZADO

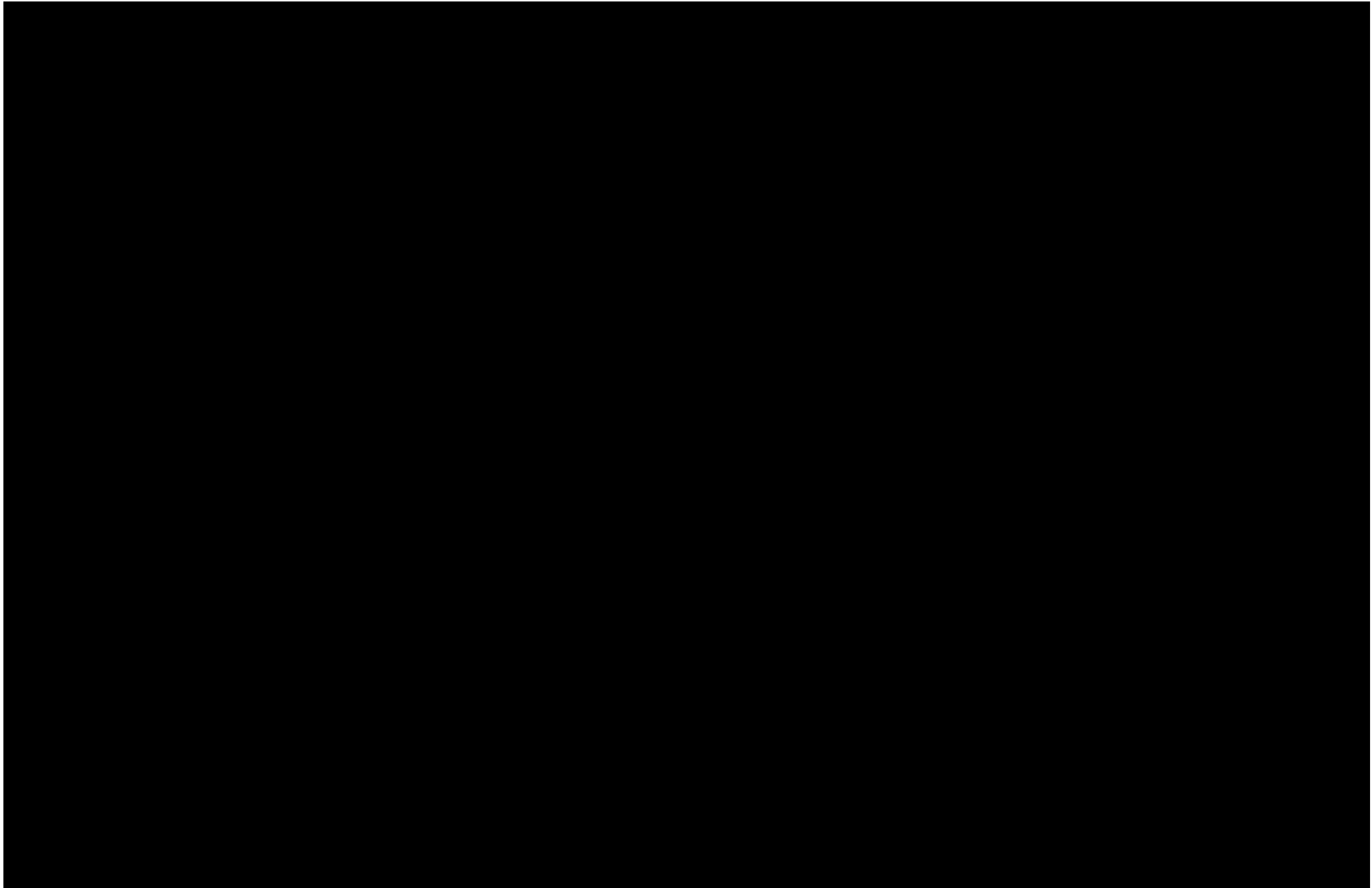
8 RIESGOS GEOLÓGICOS

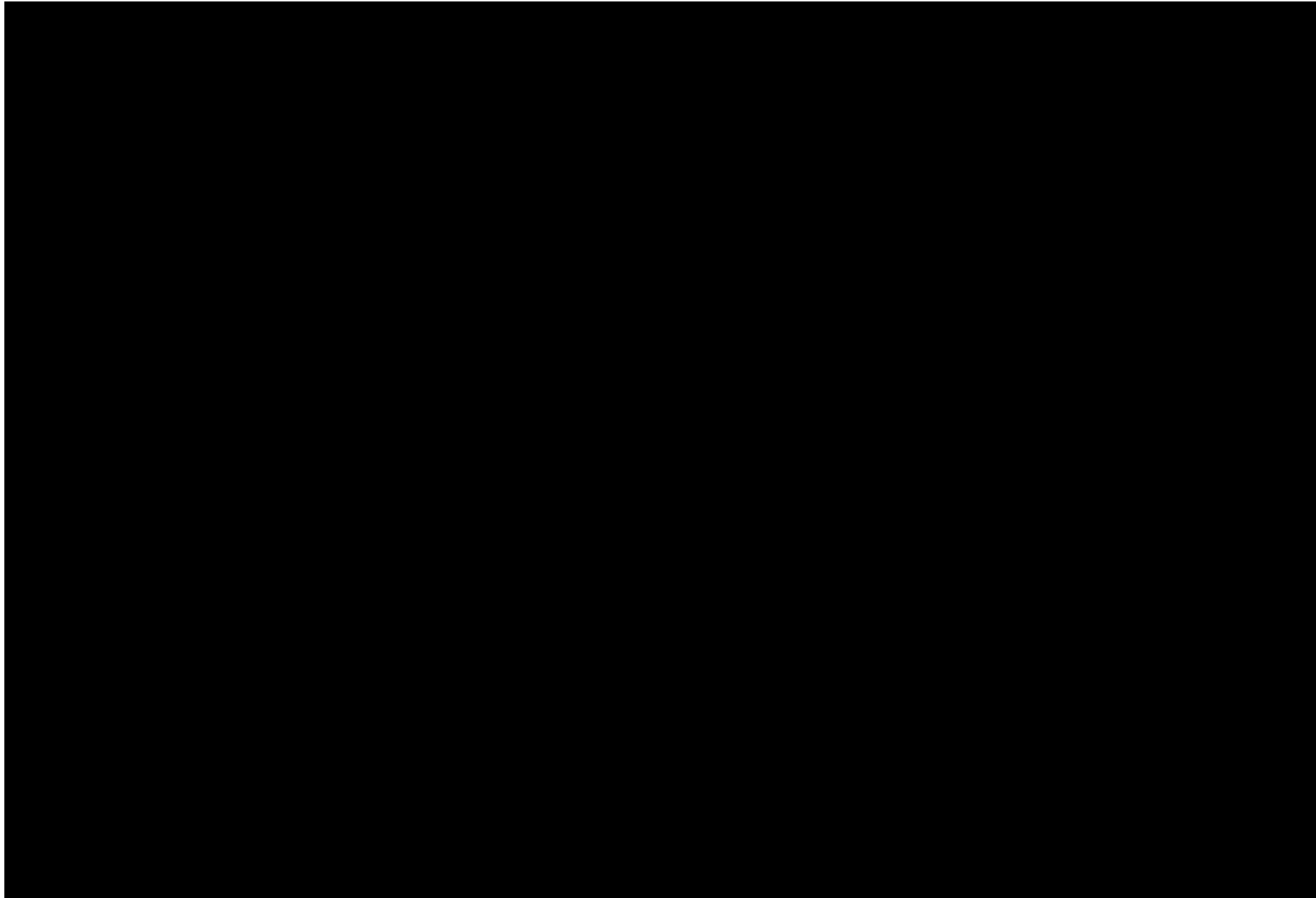


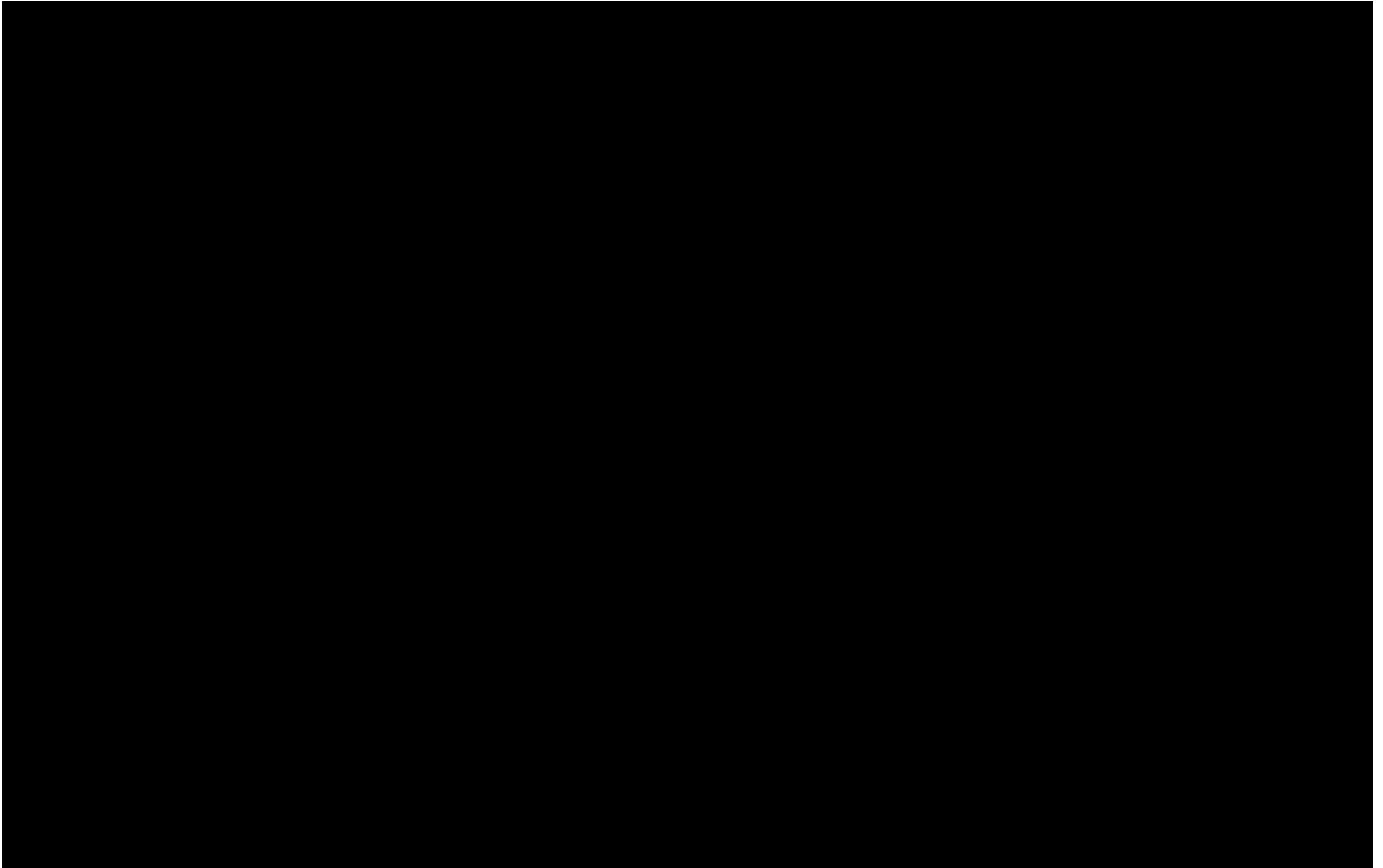


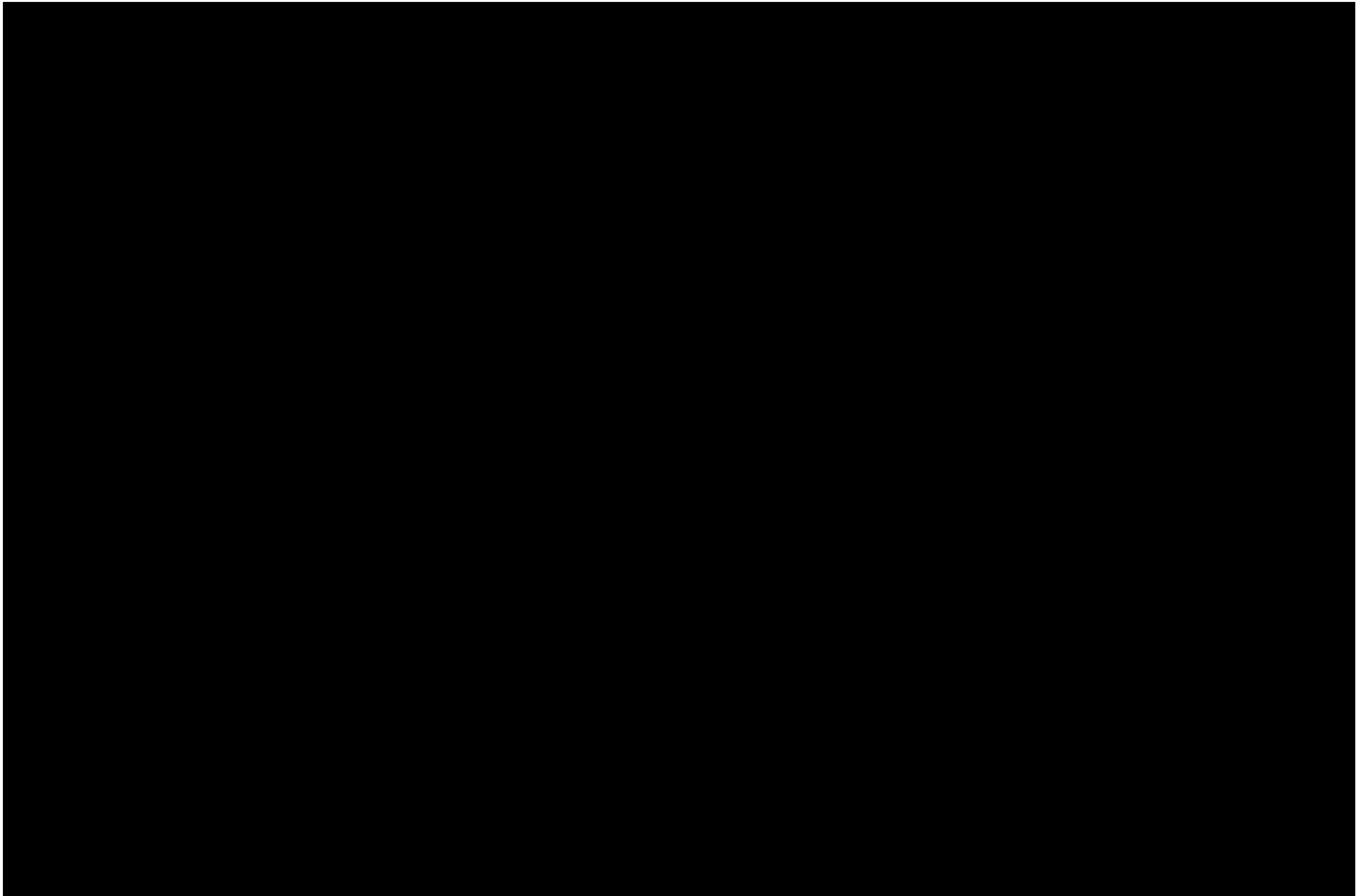
9 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA



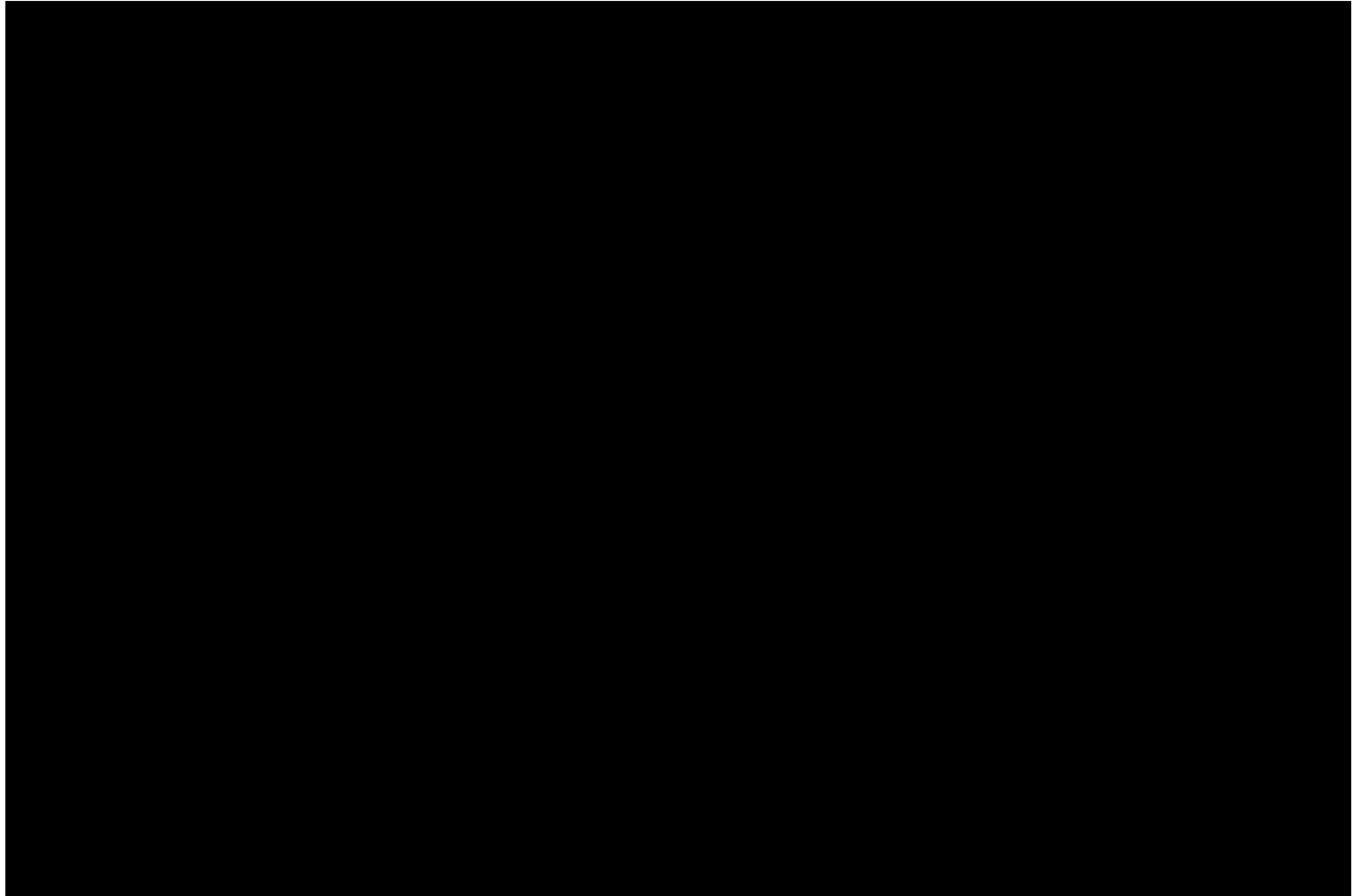


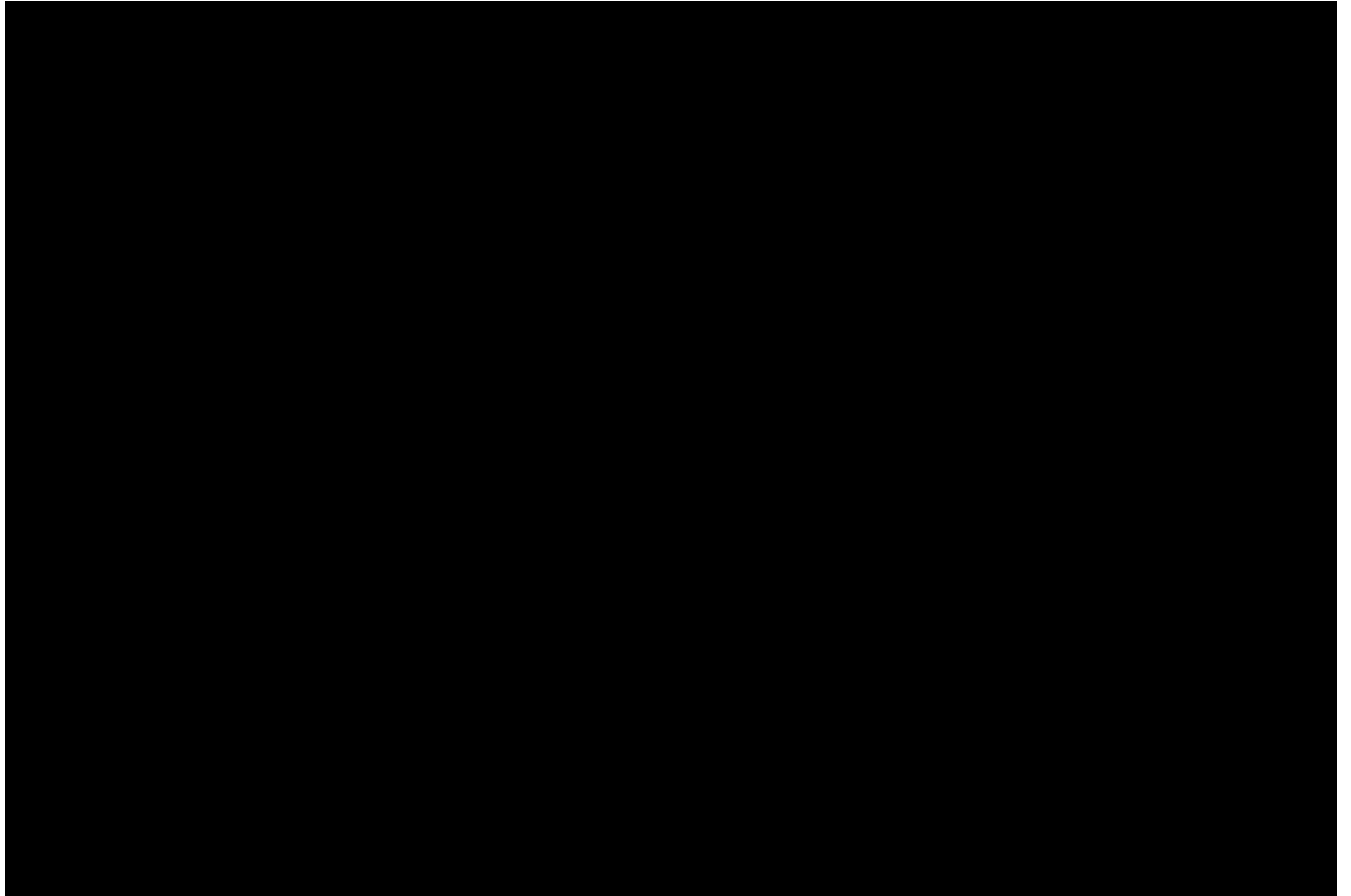


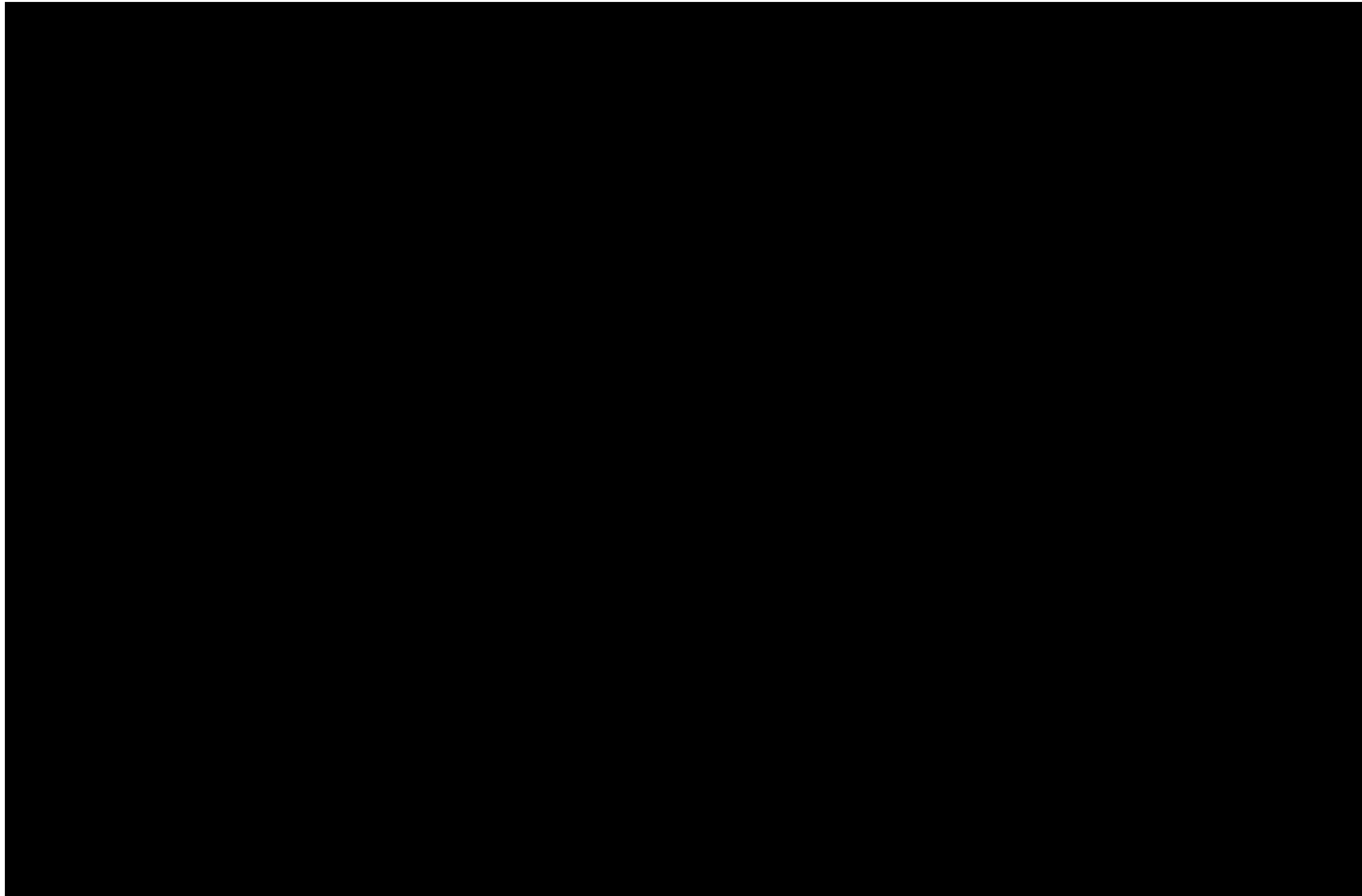


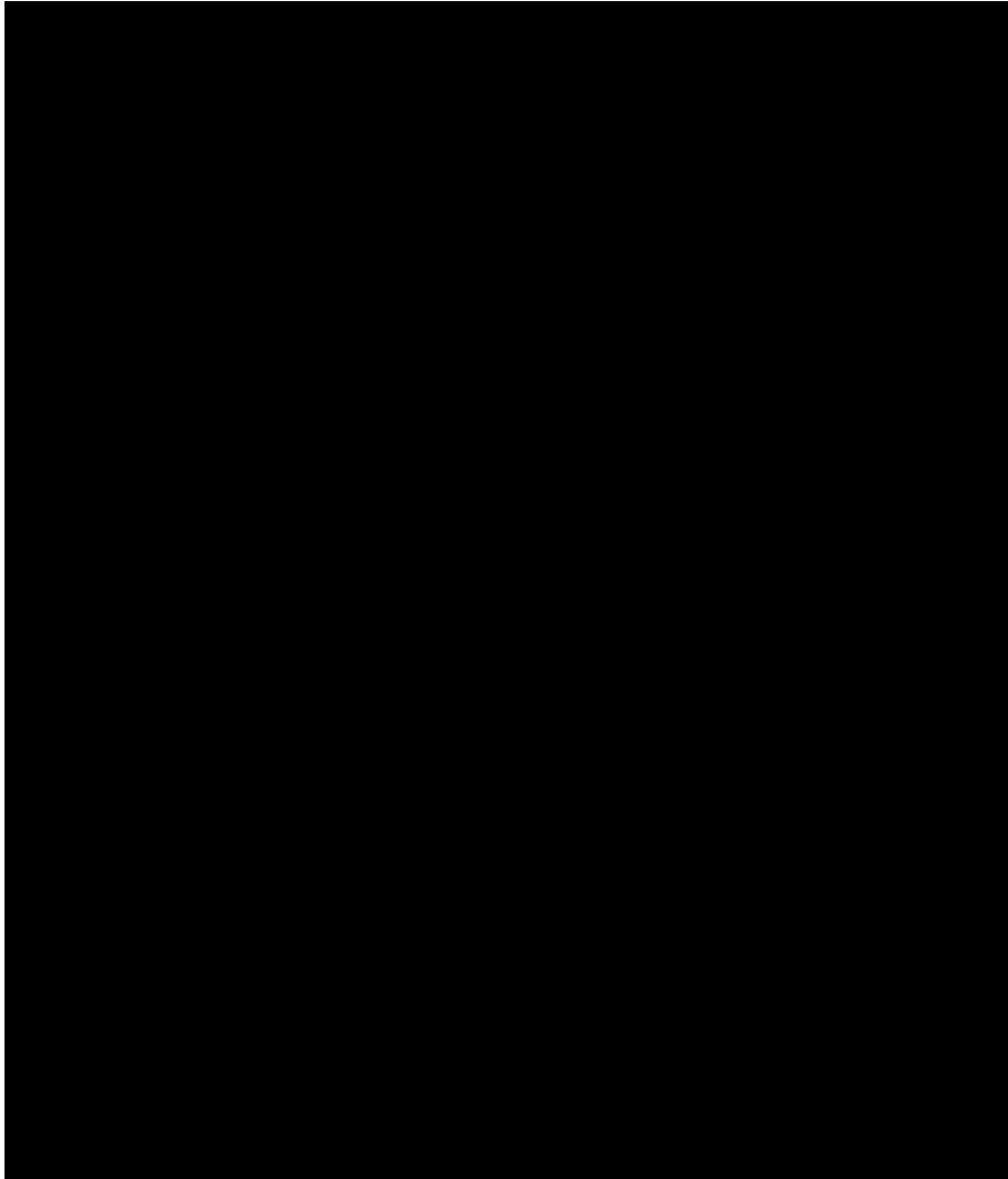


10 ENSAYOS DE LABORATORIO

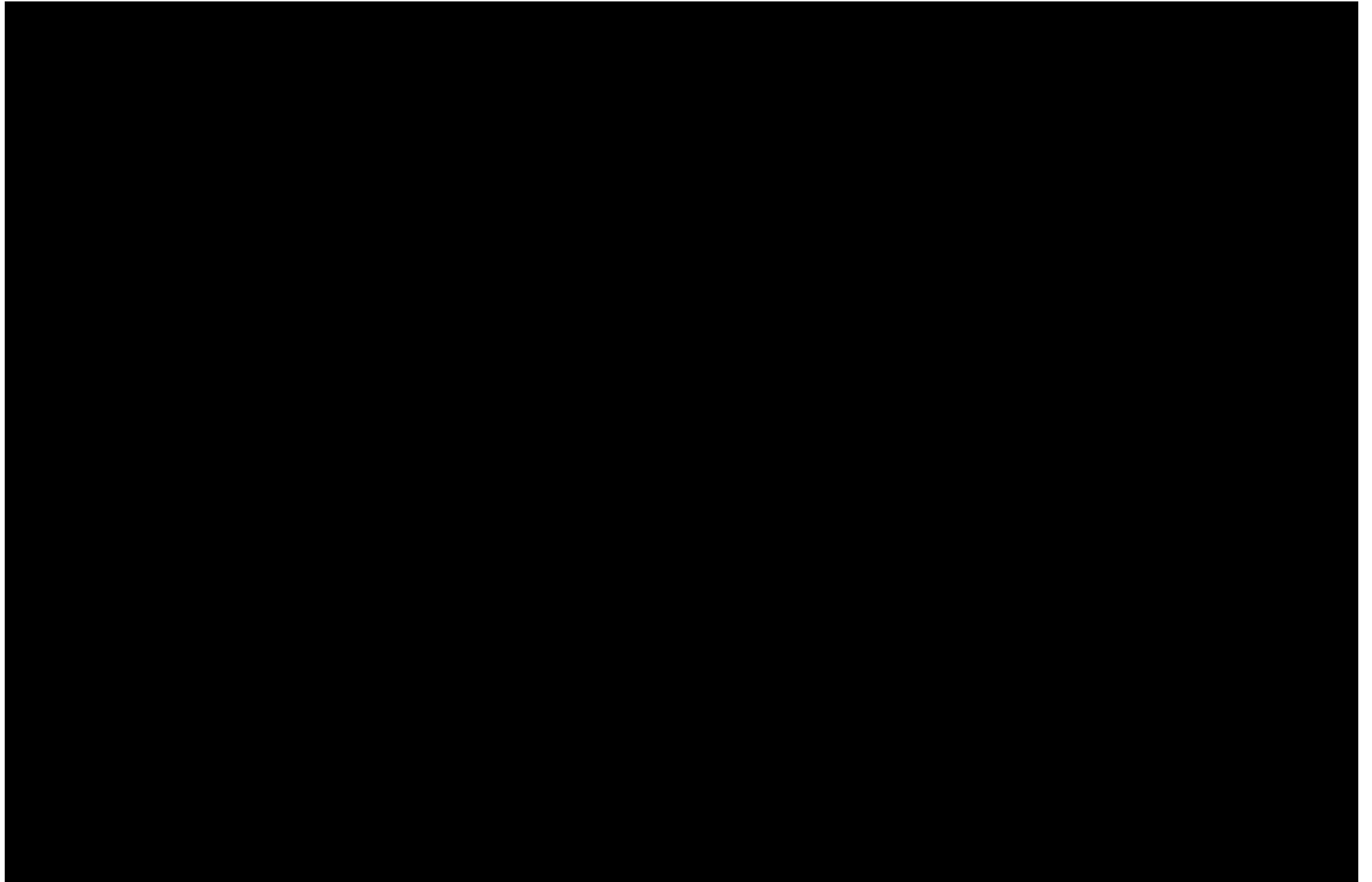


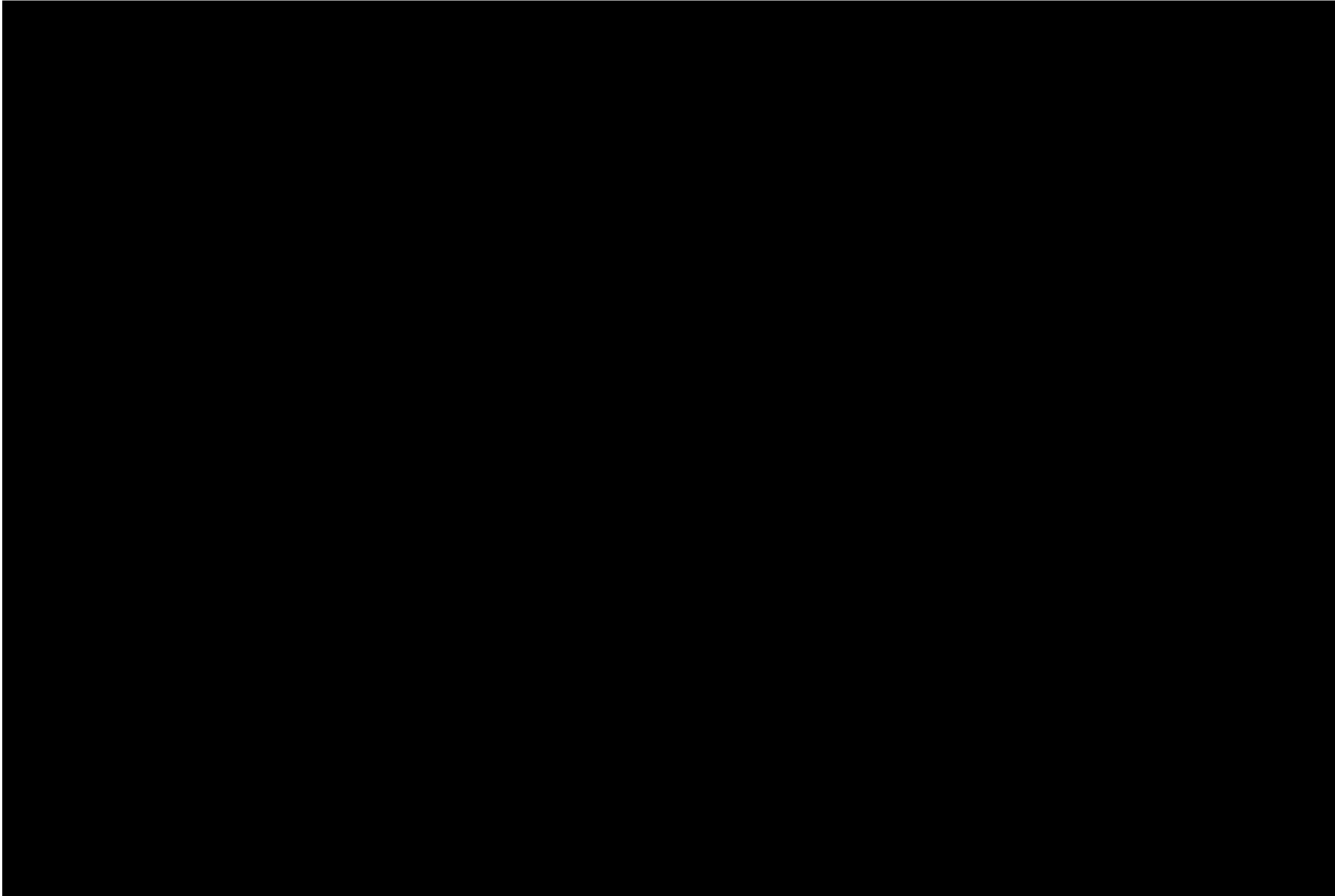


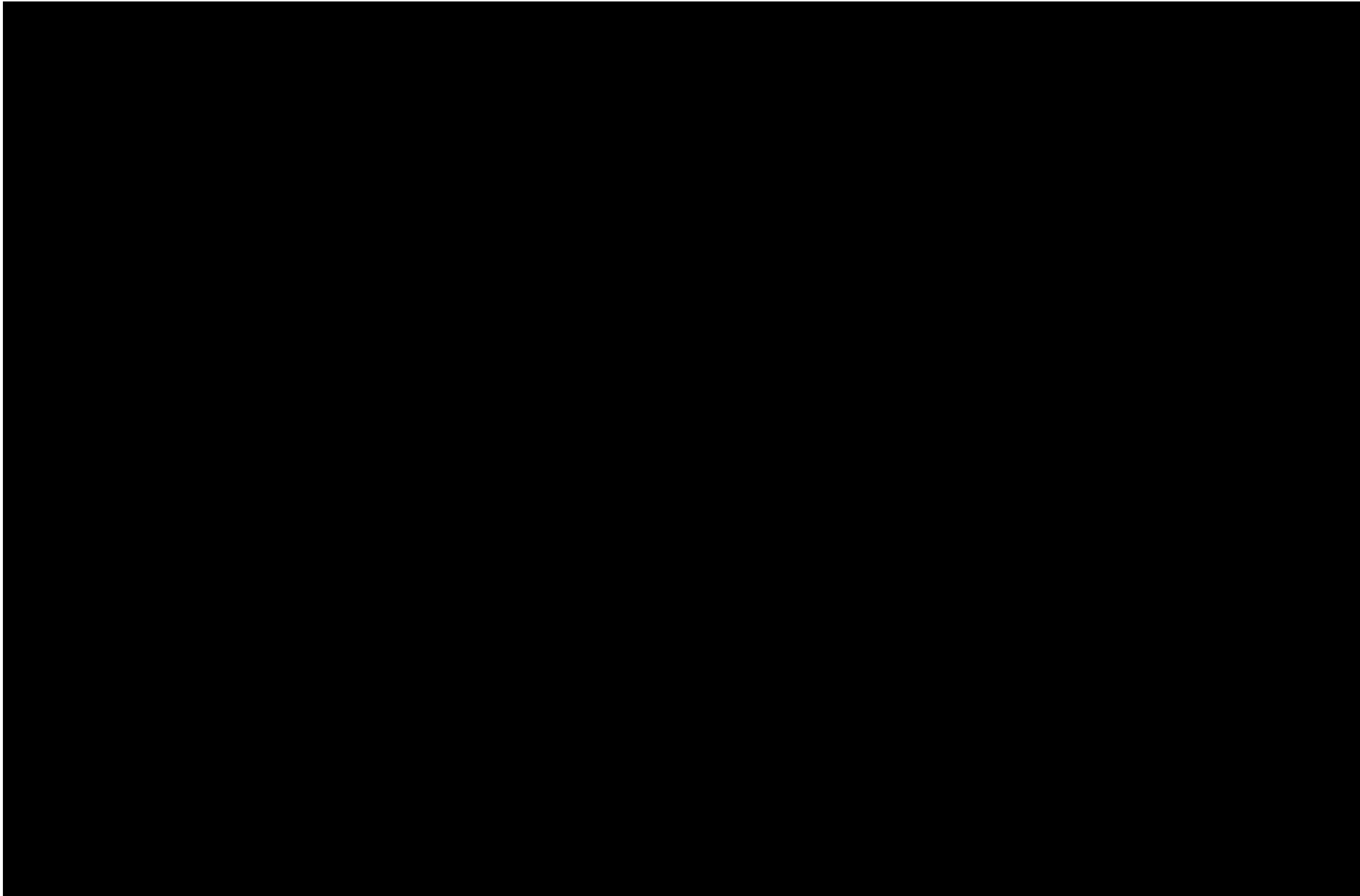


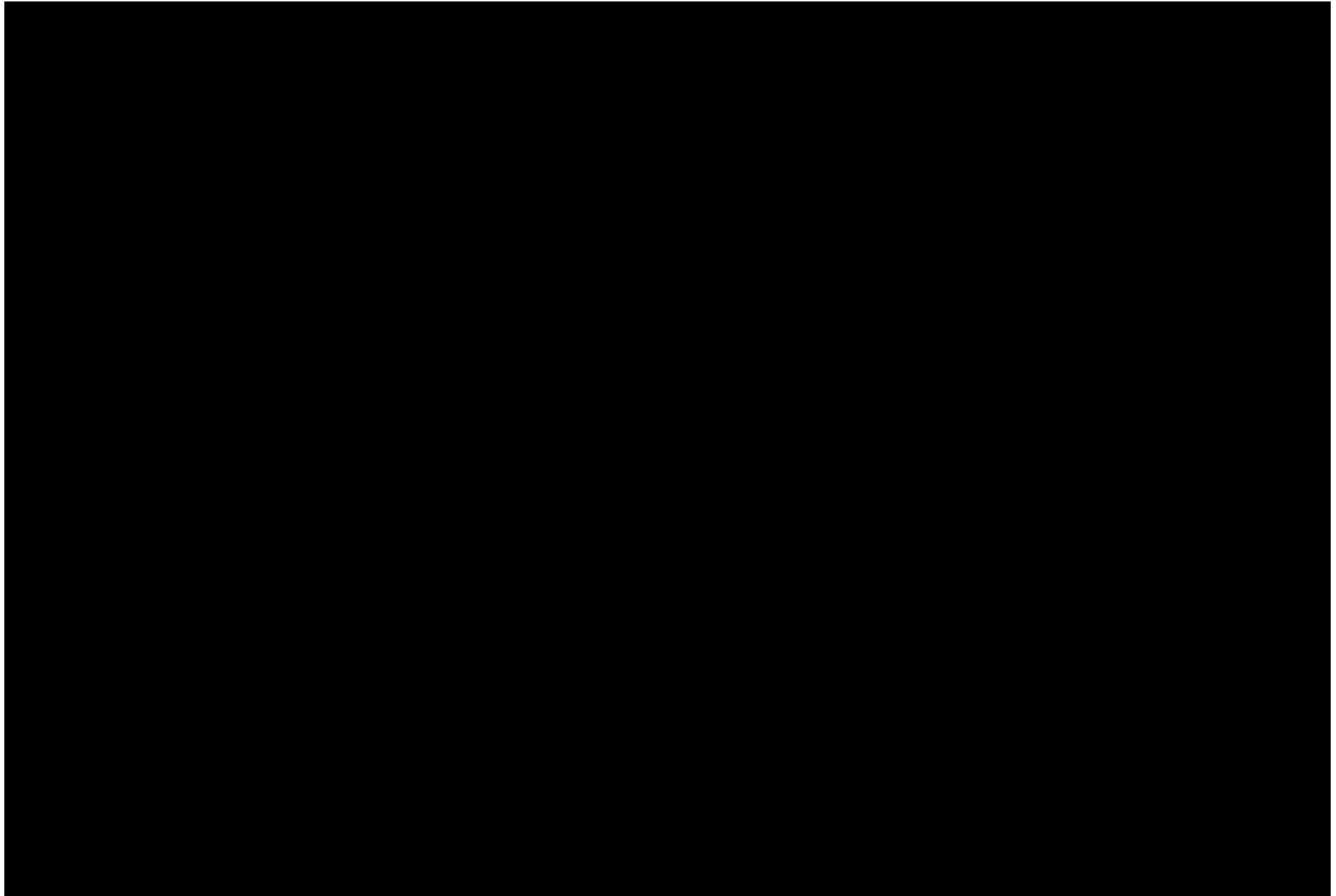


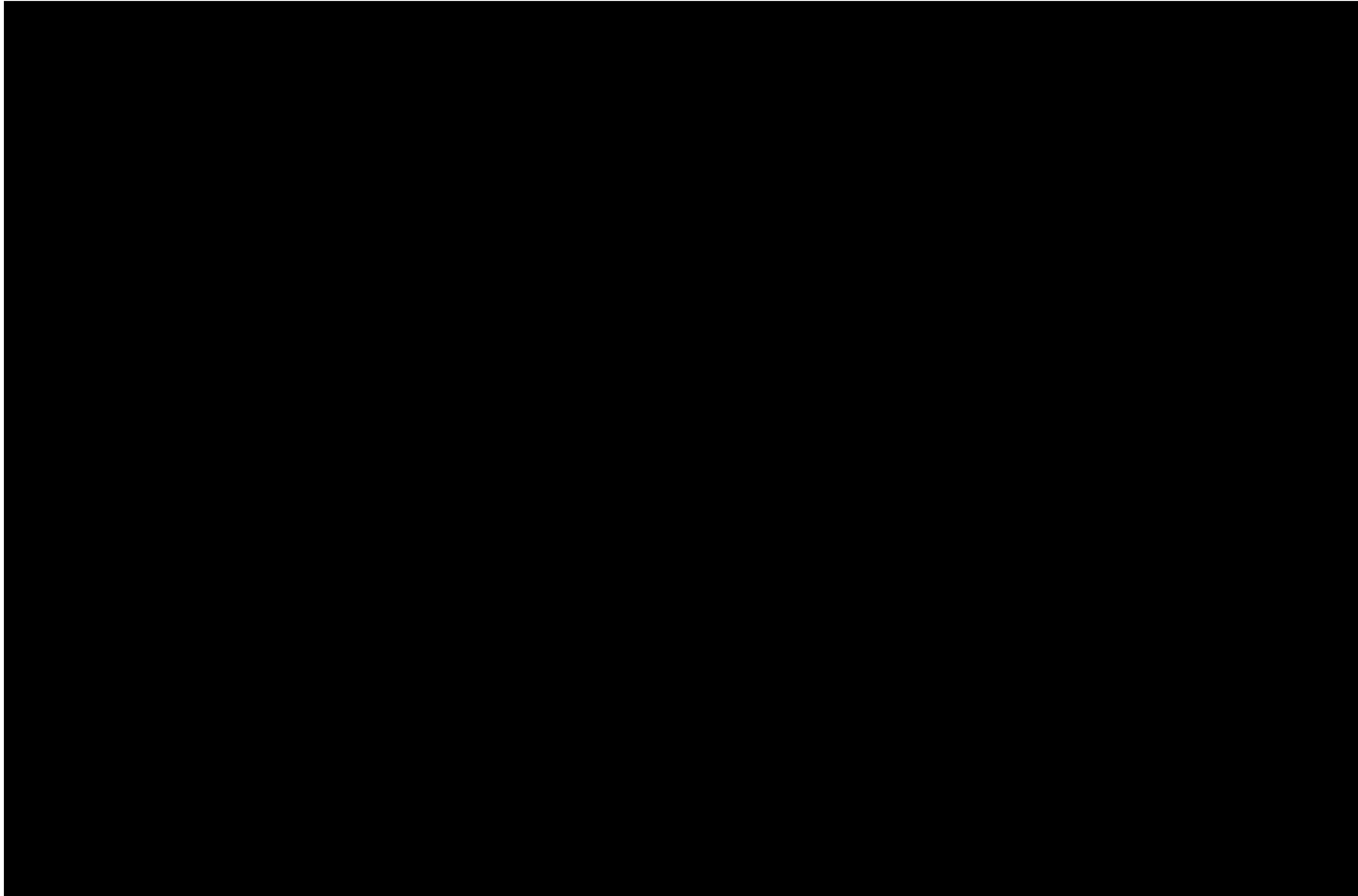
11 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS MATERIALES

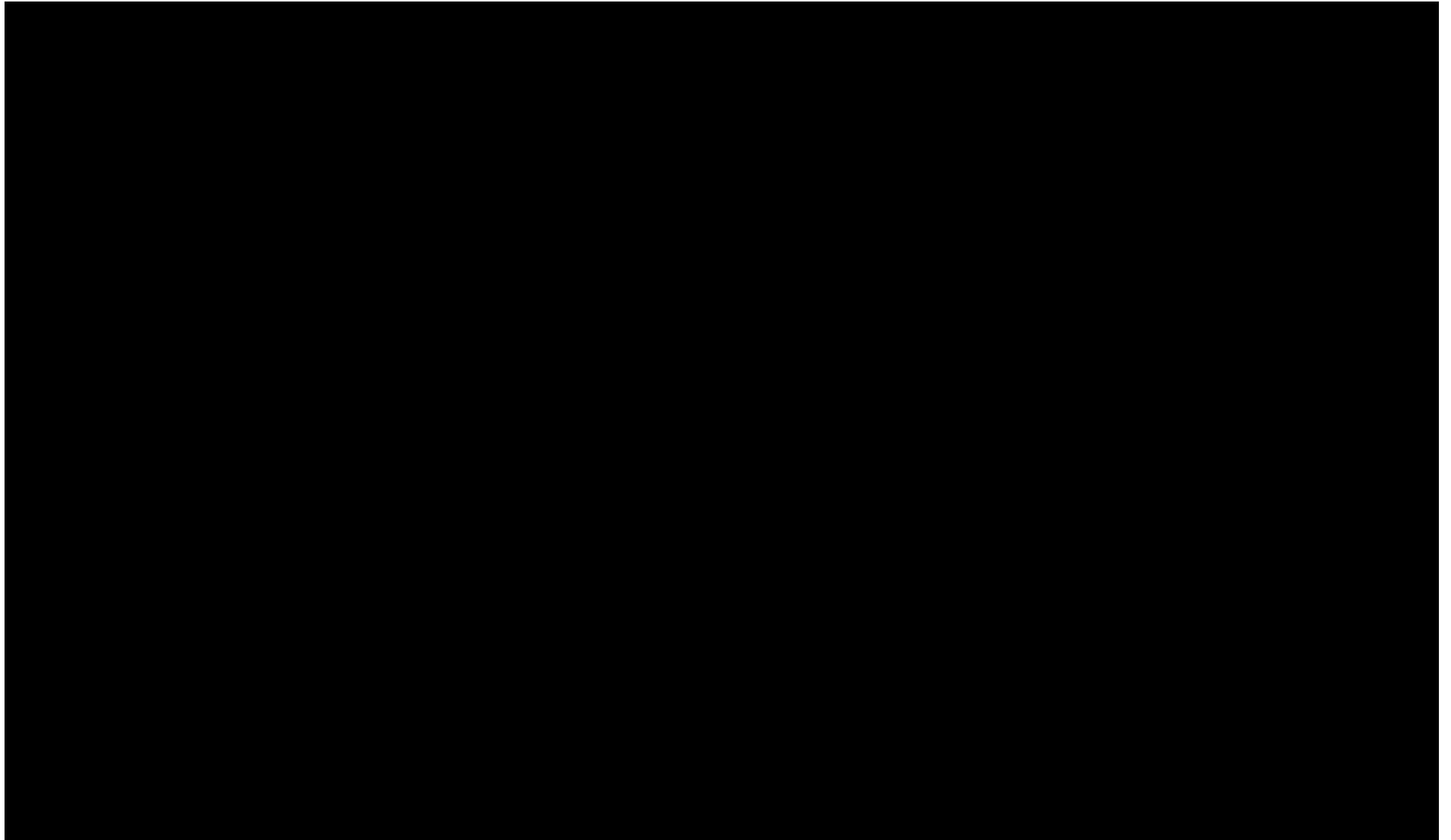


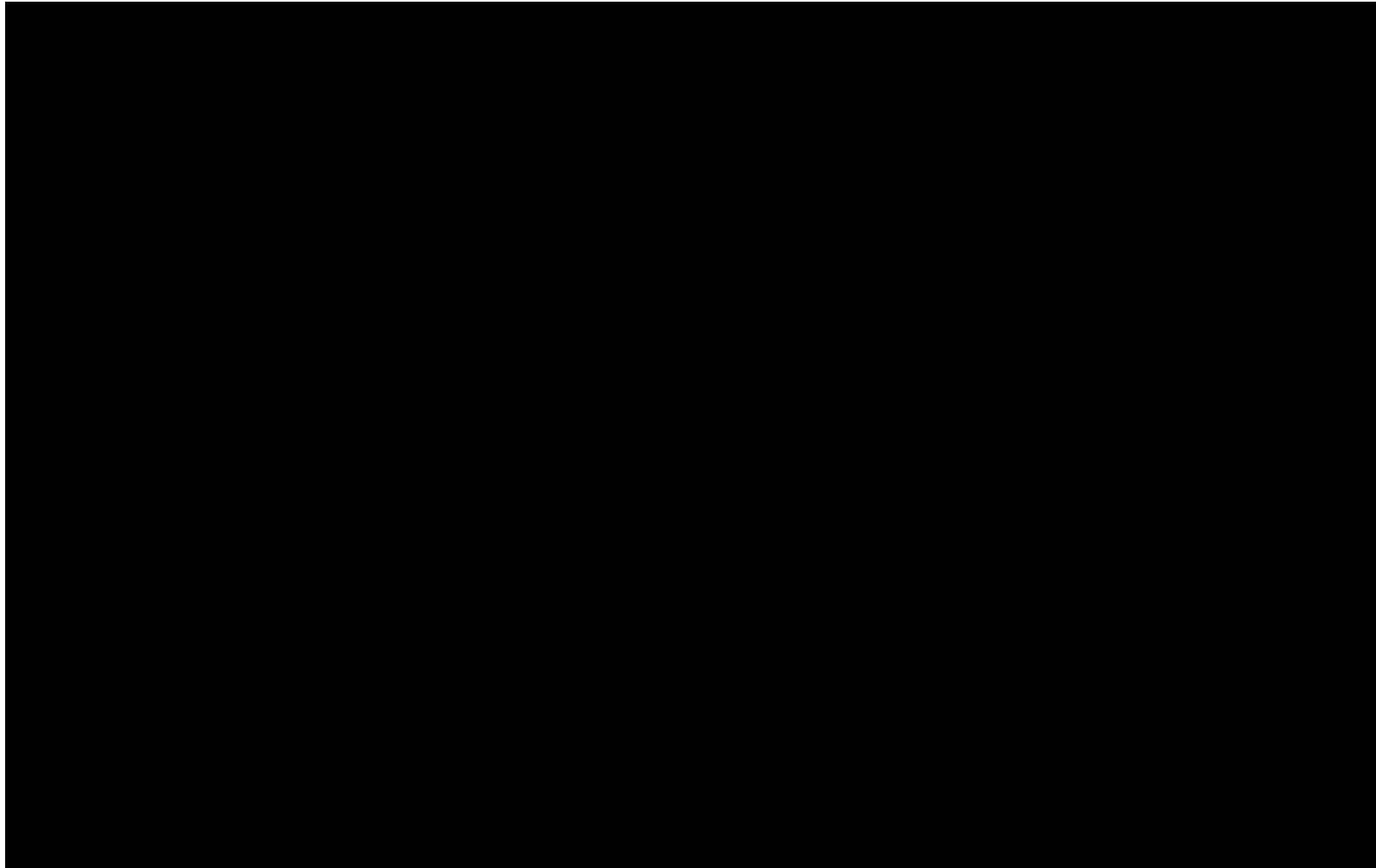


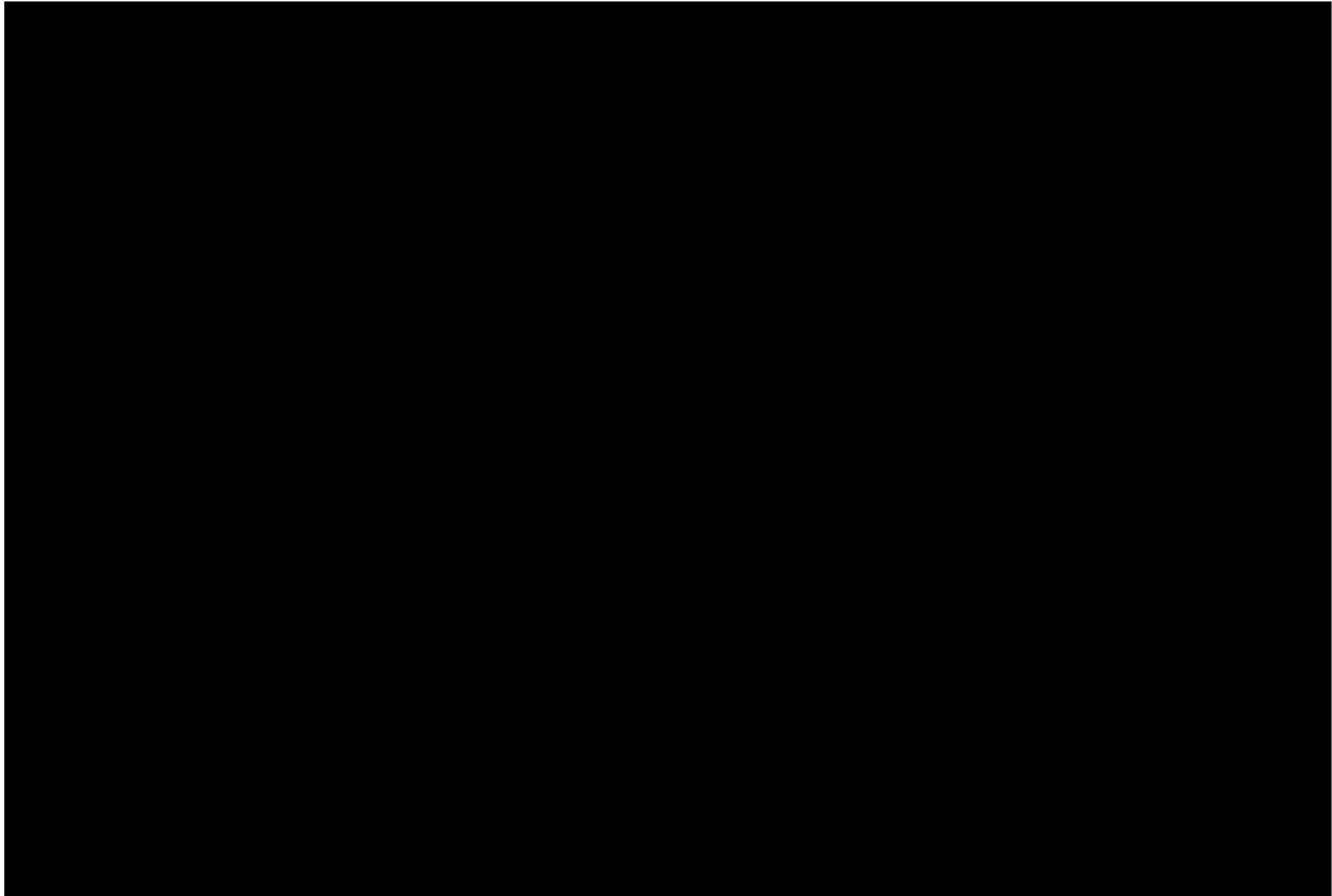


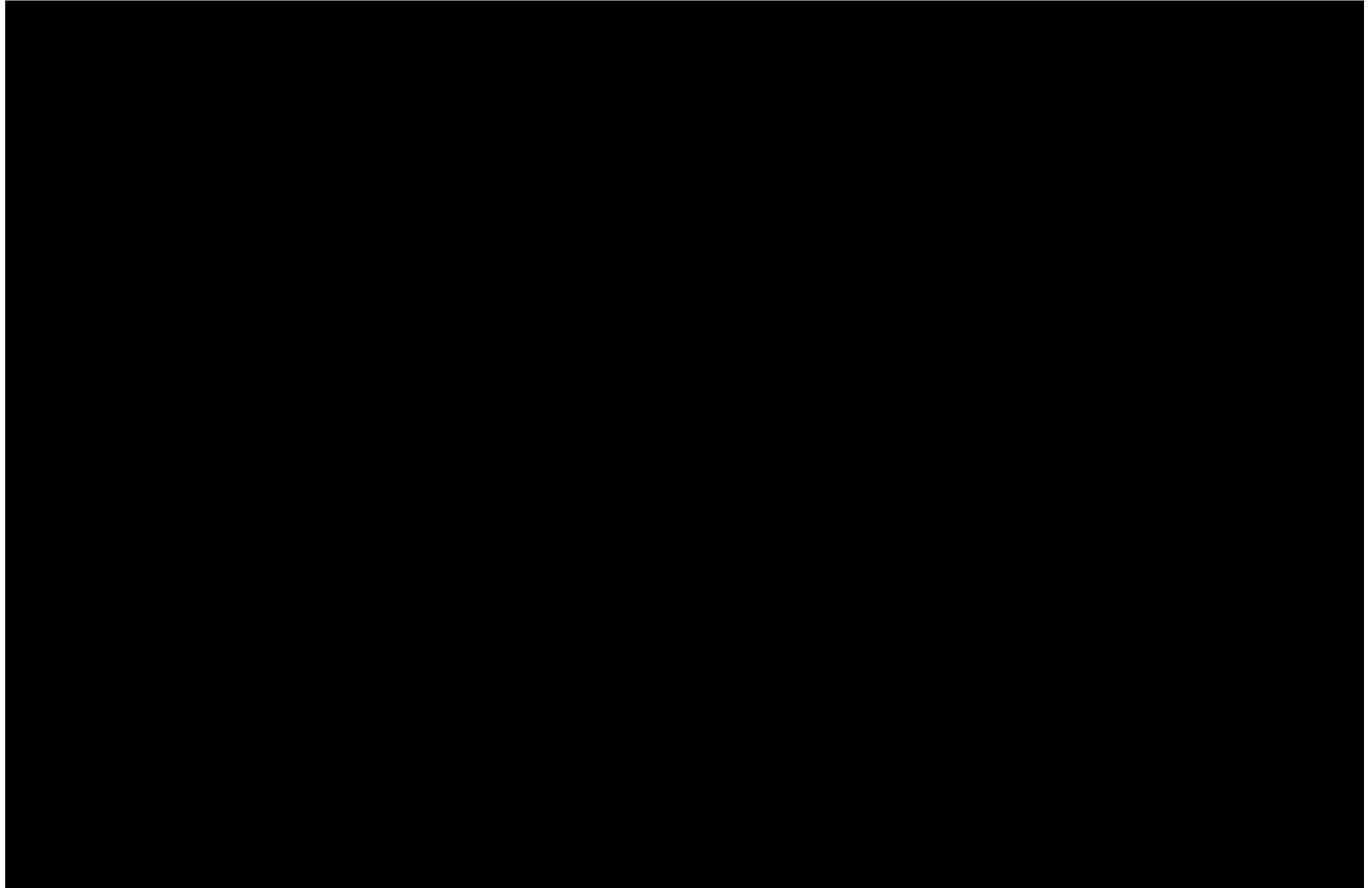


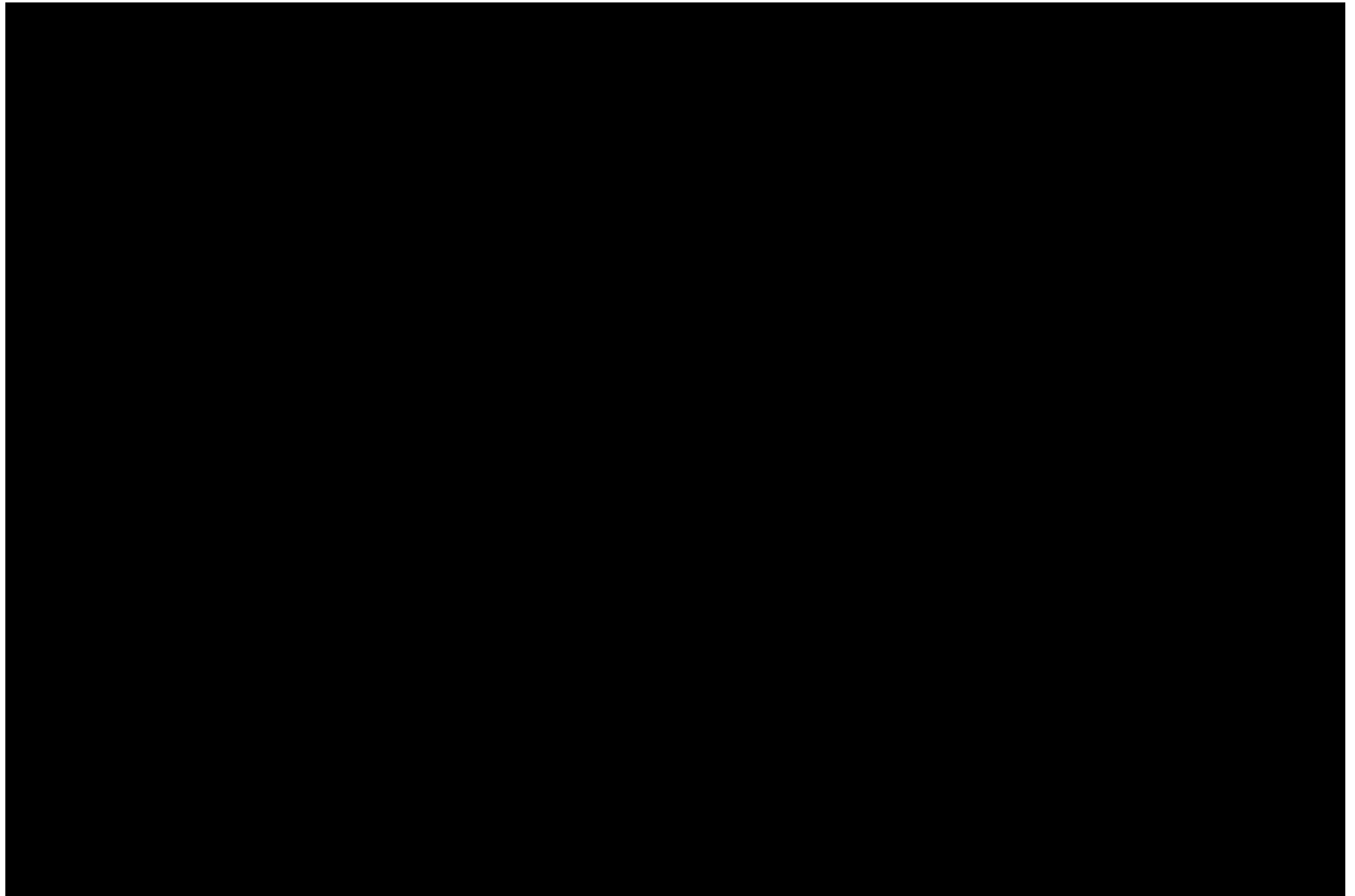


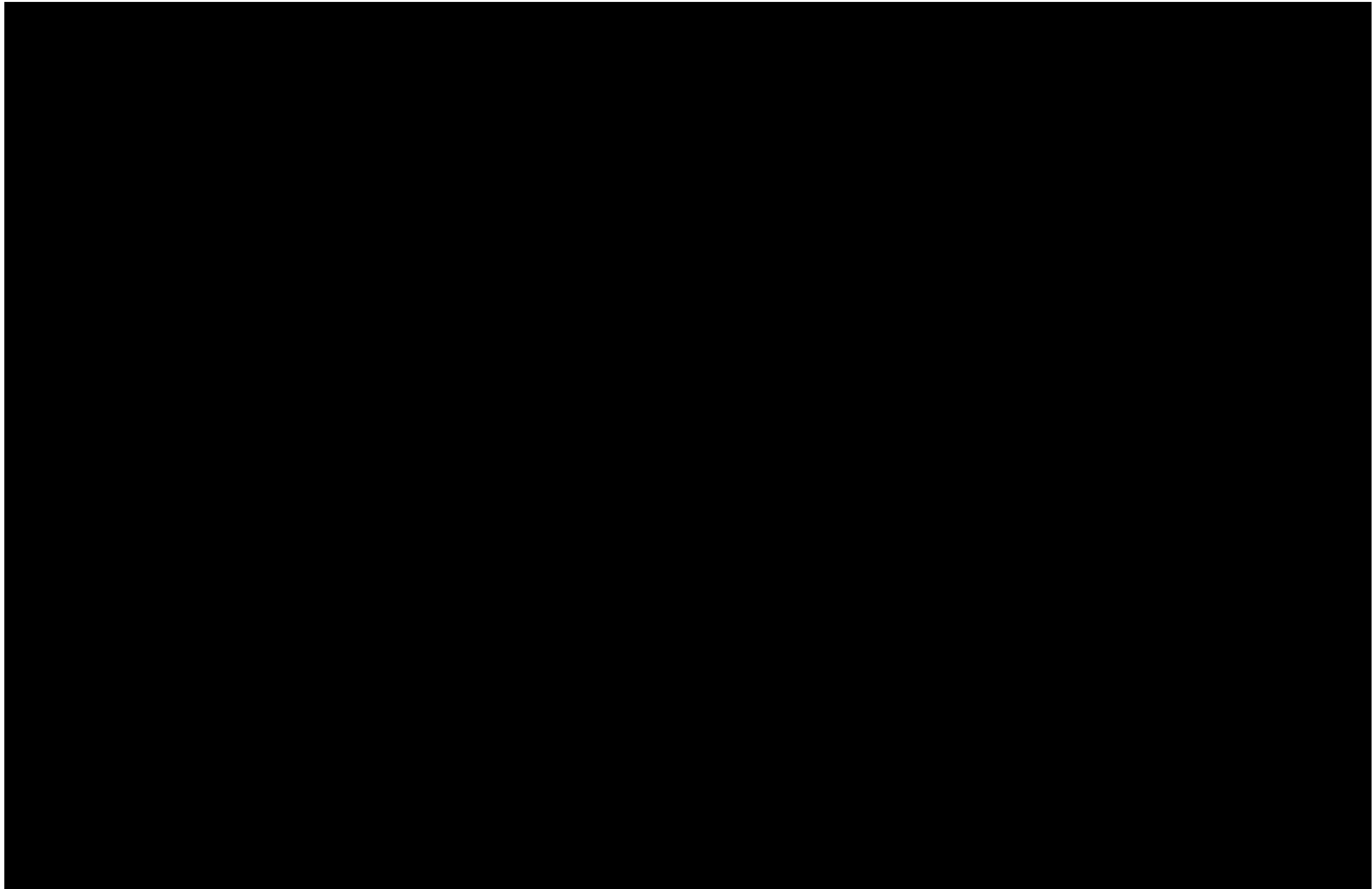


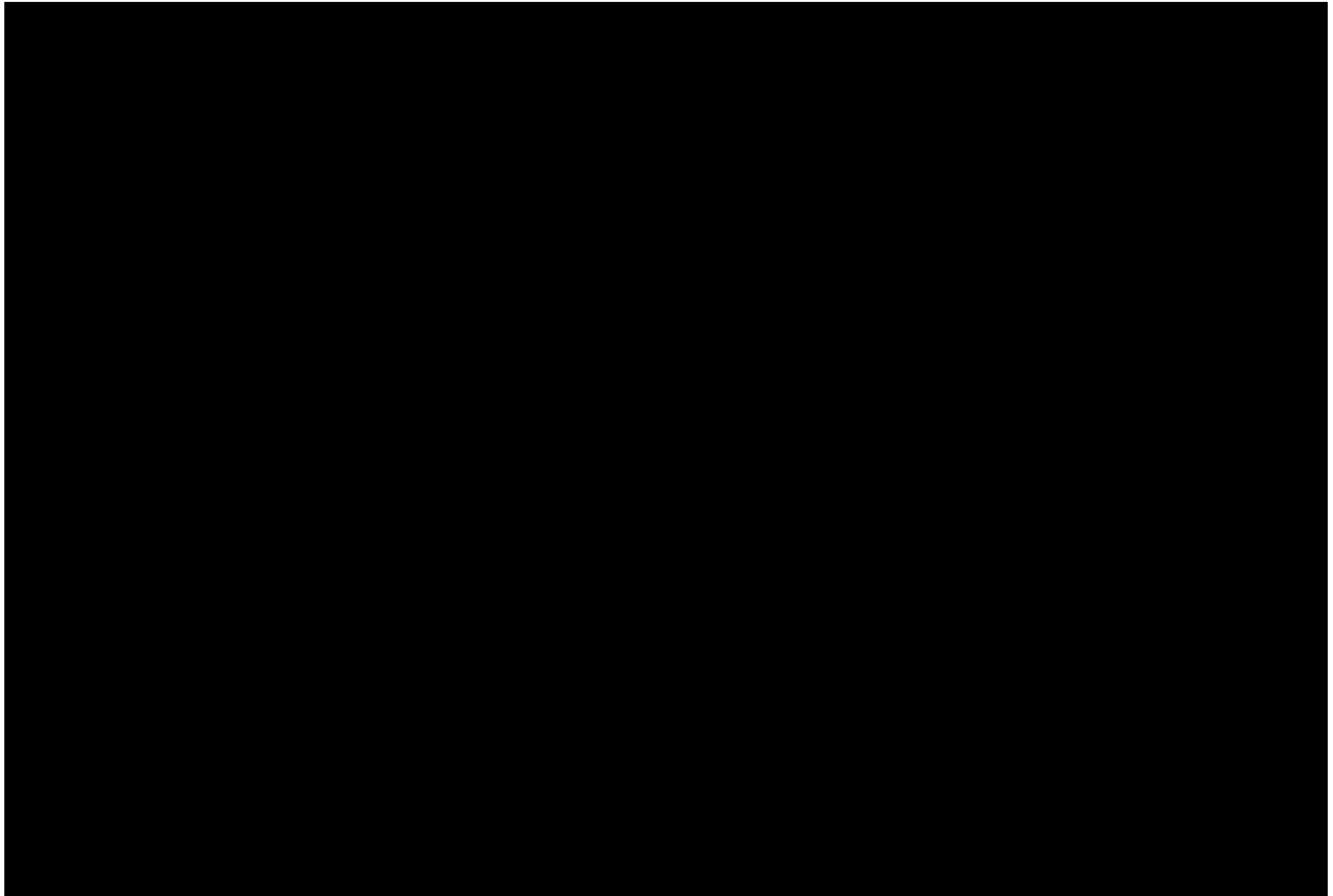


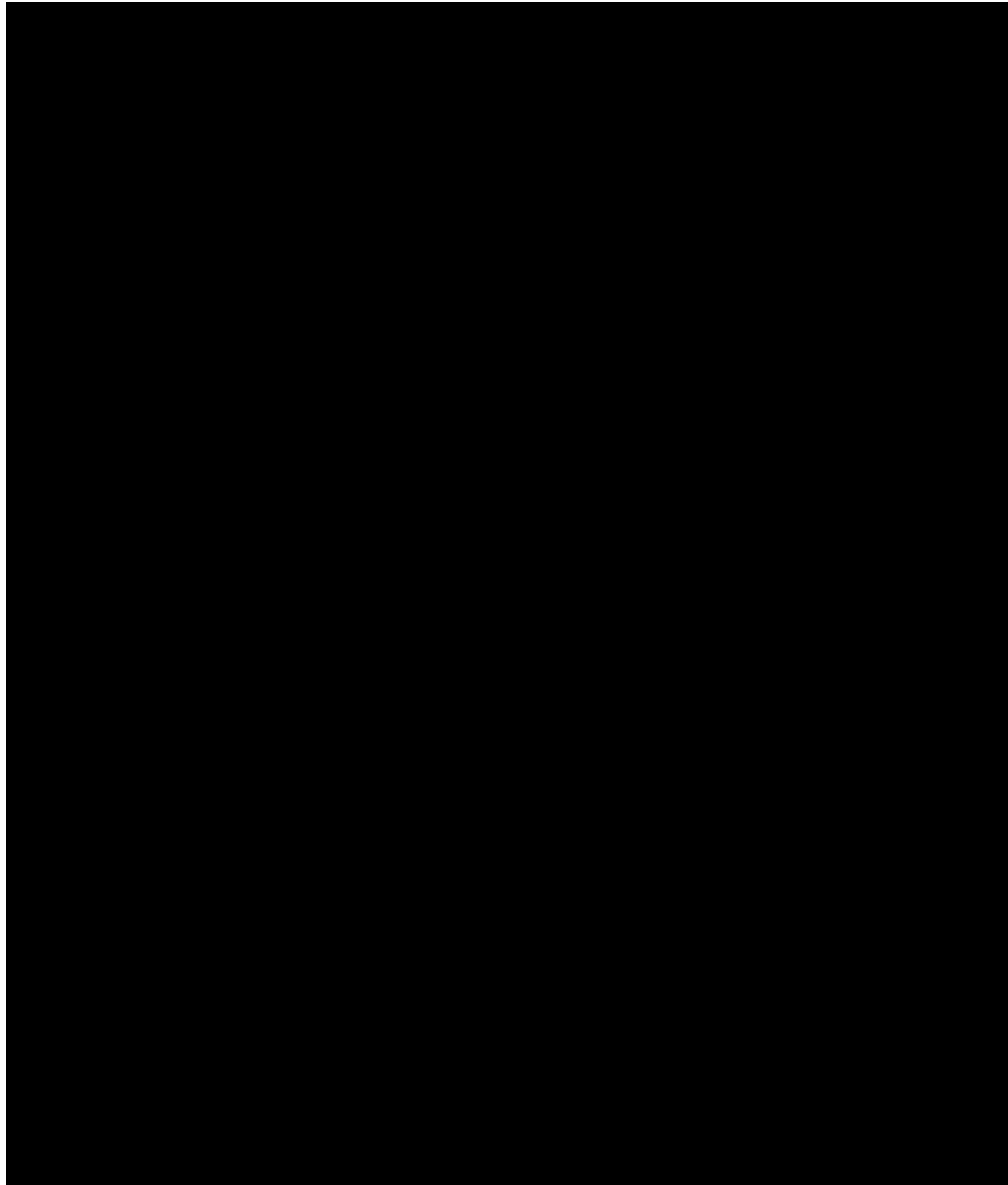


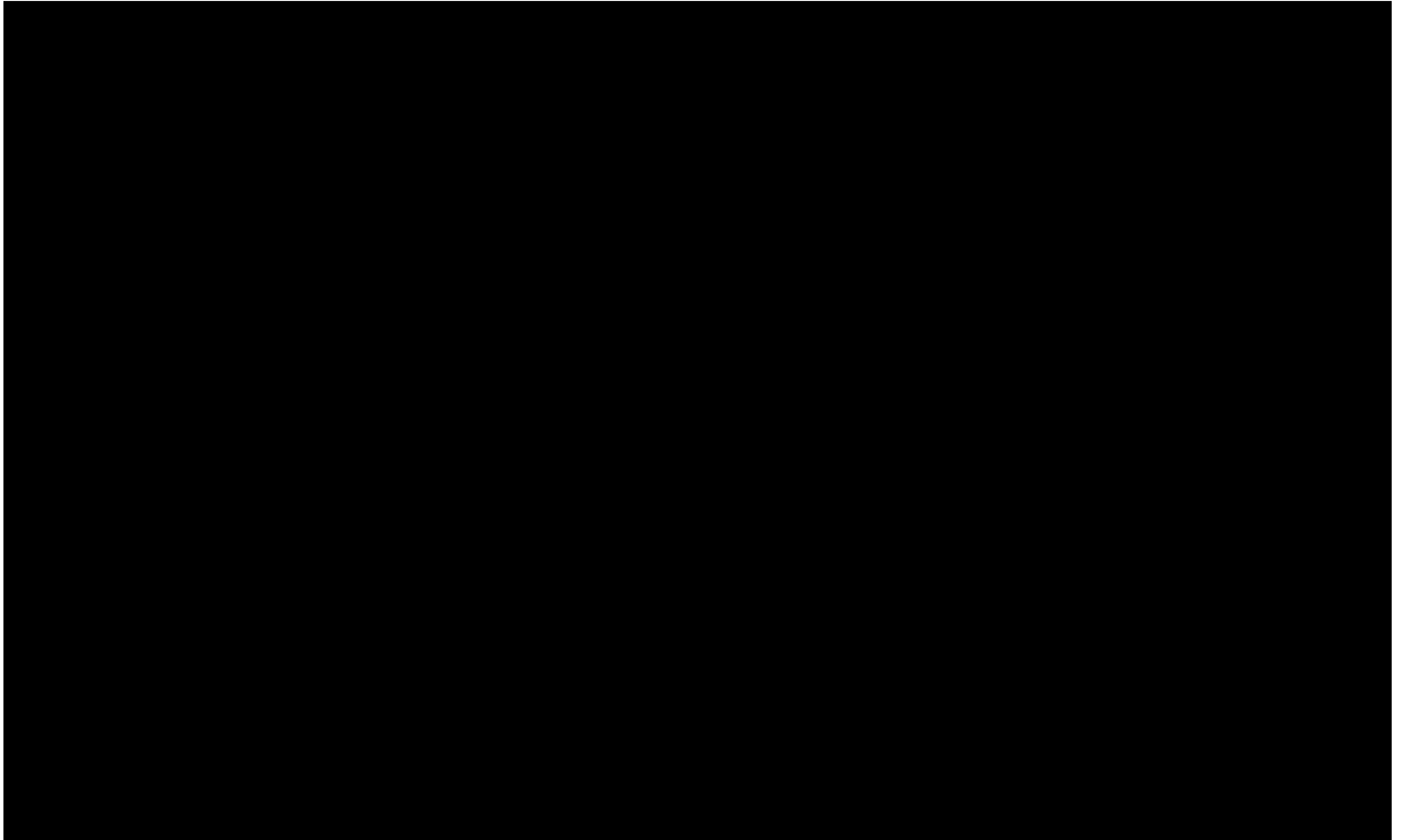


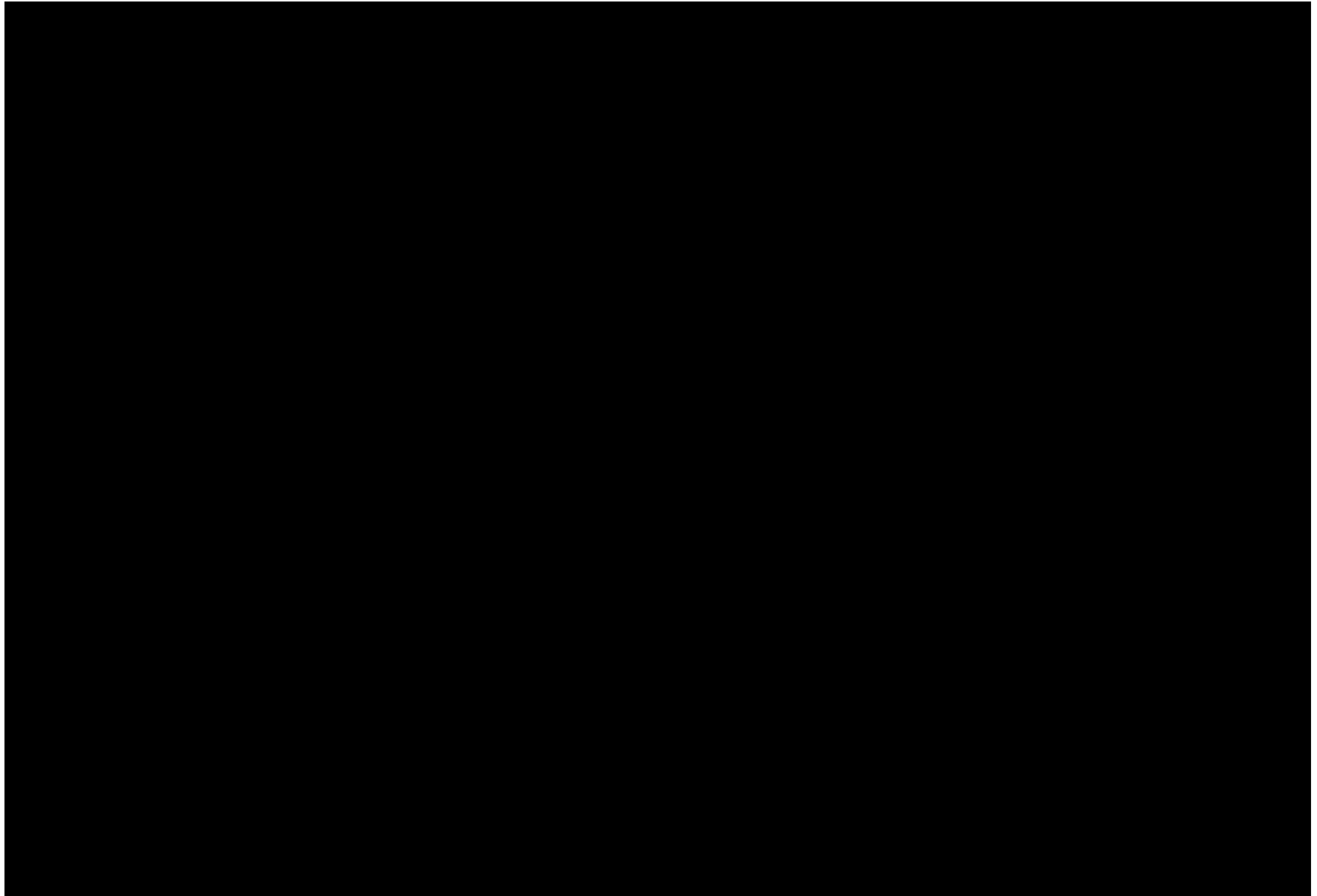


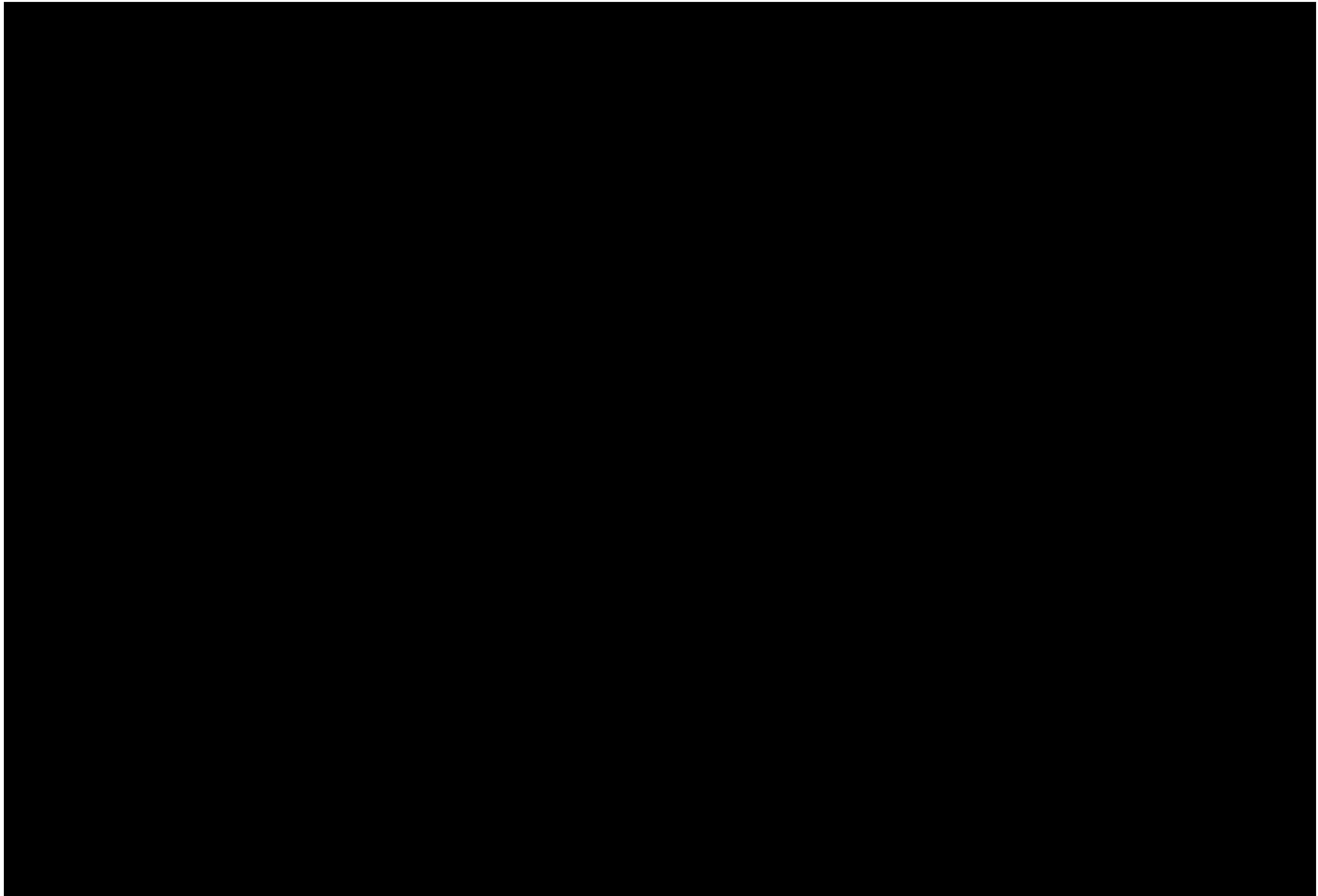


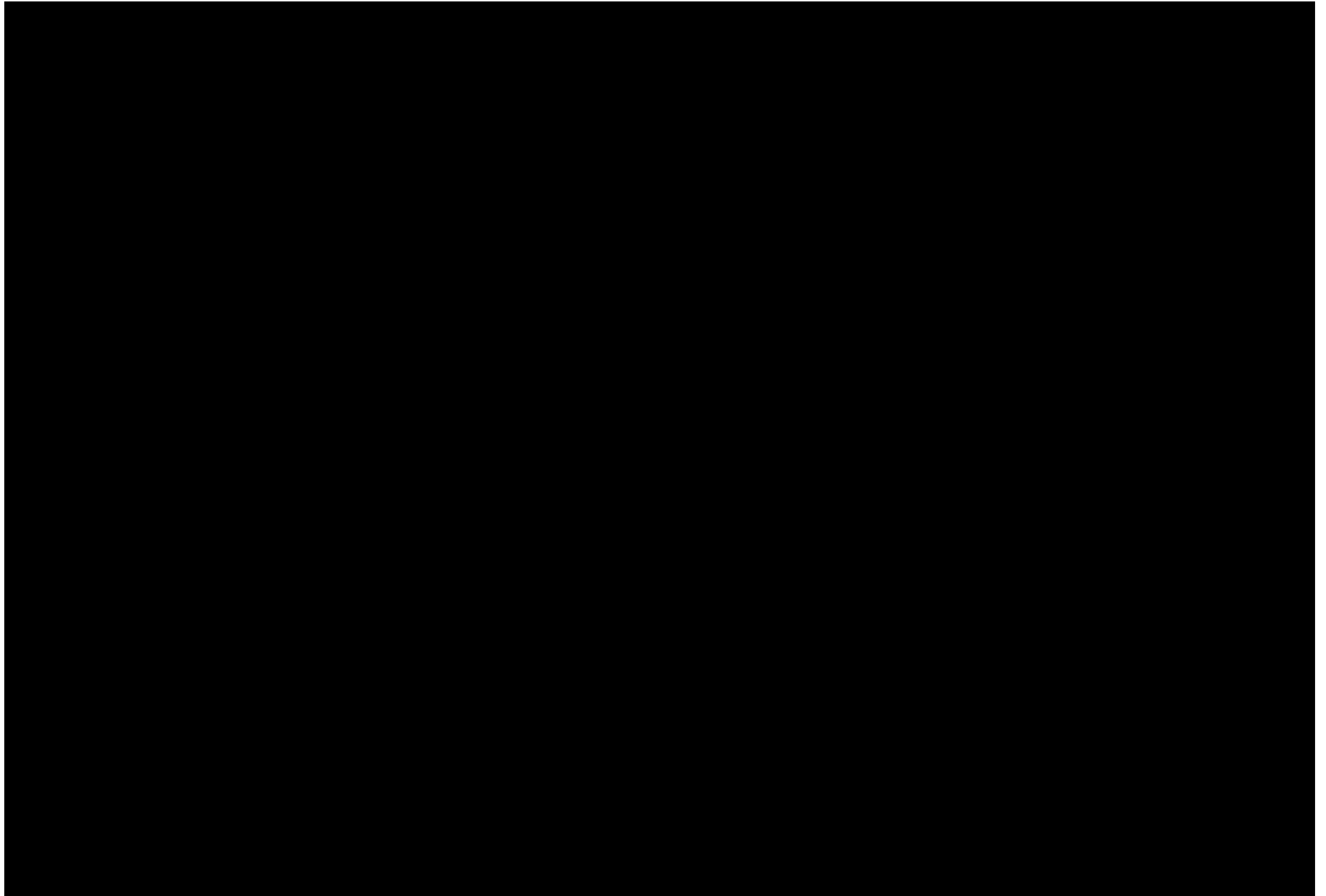


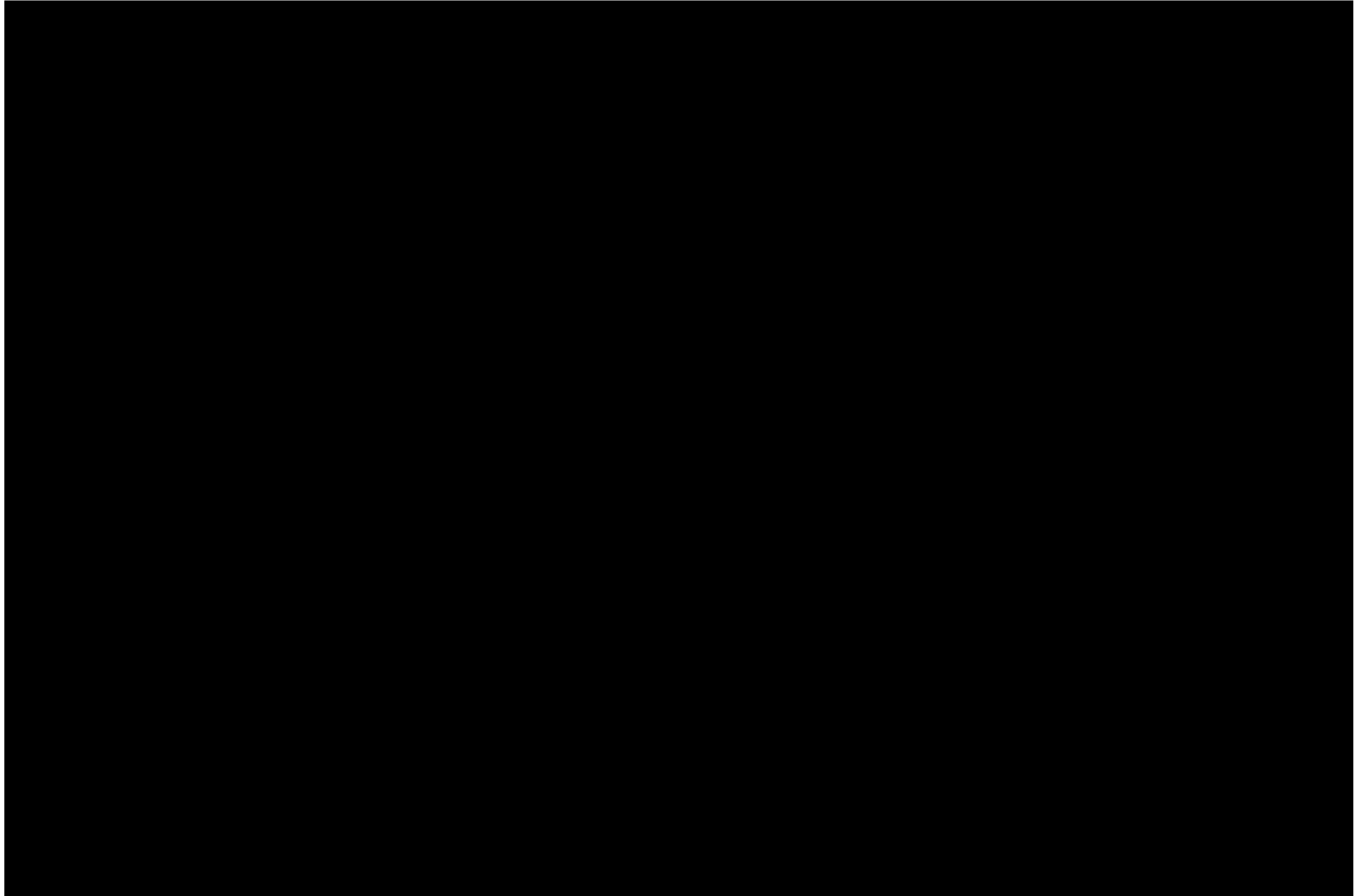


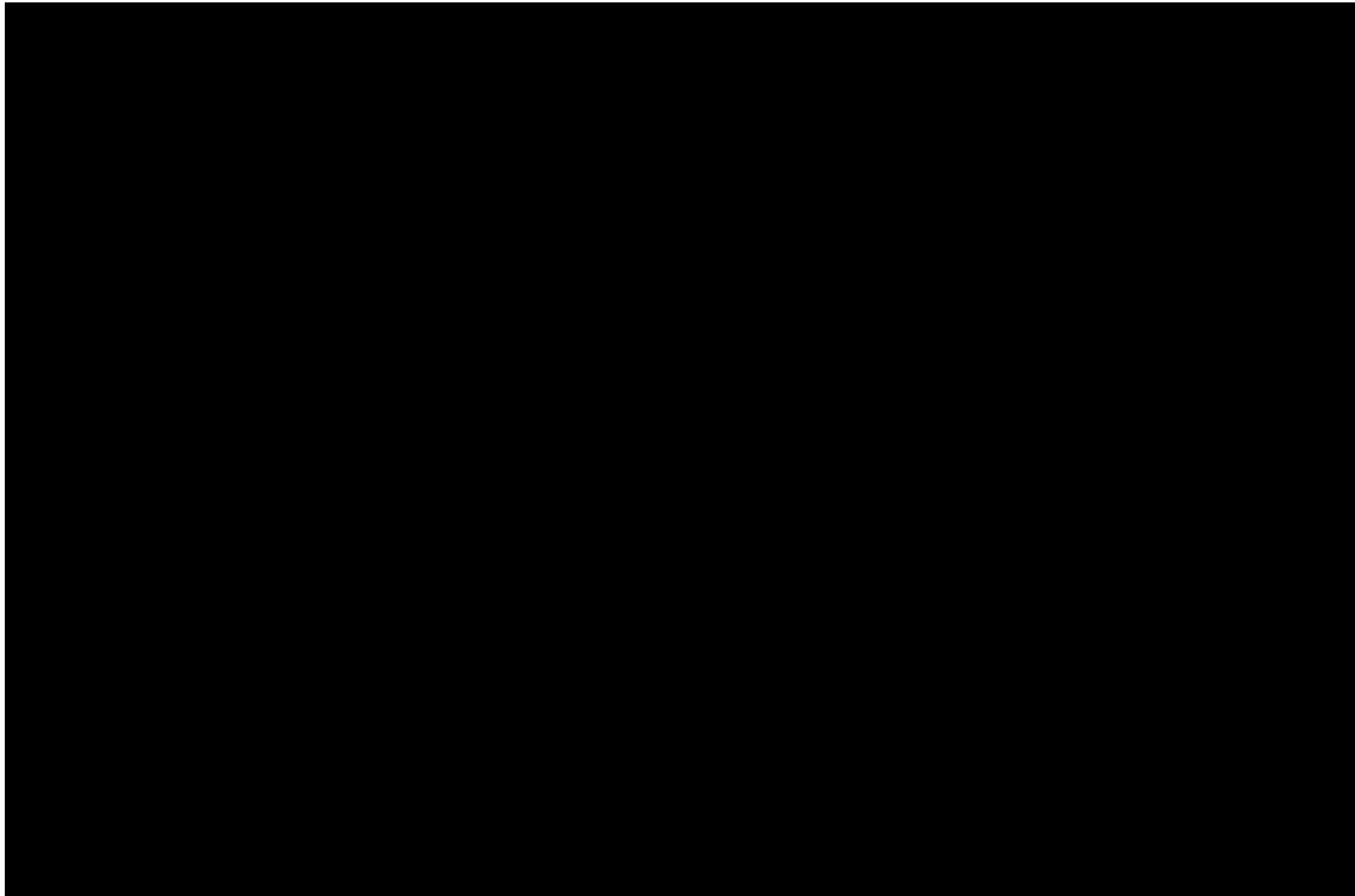


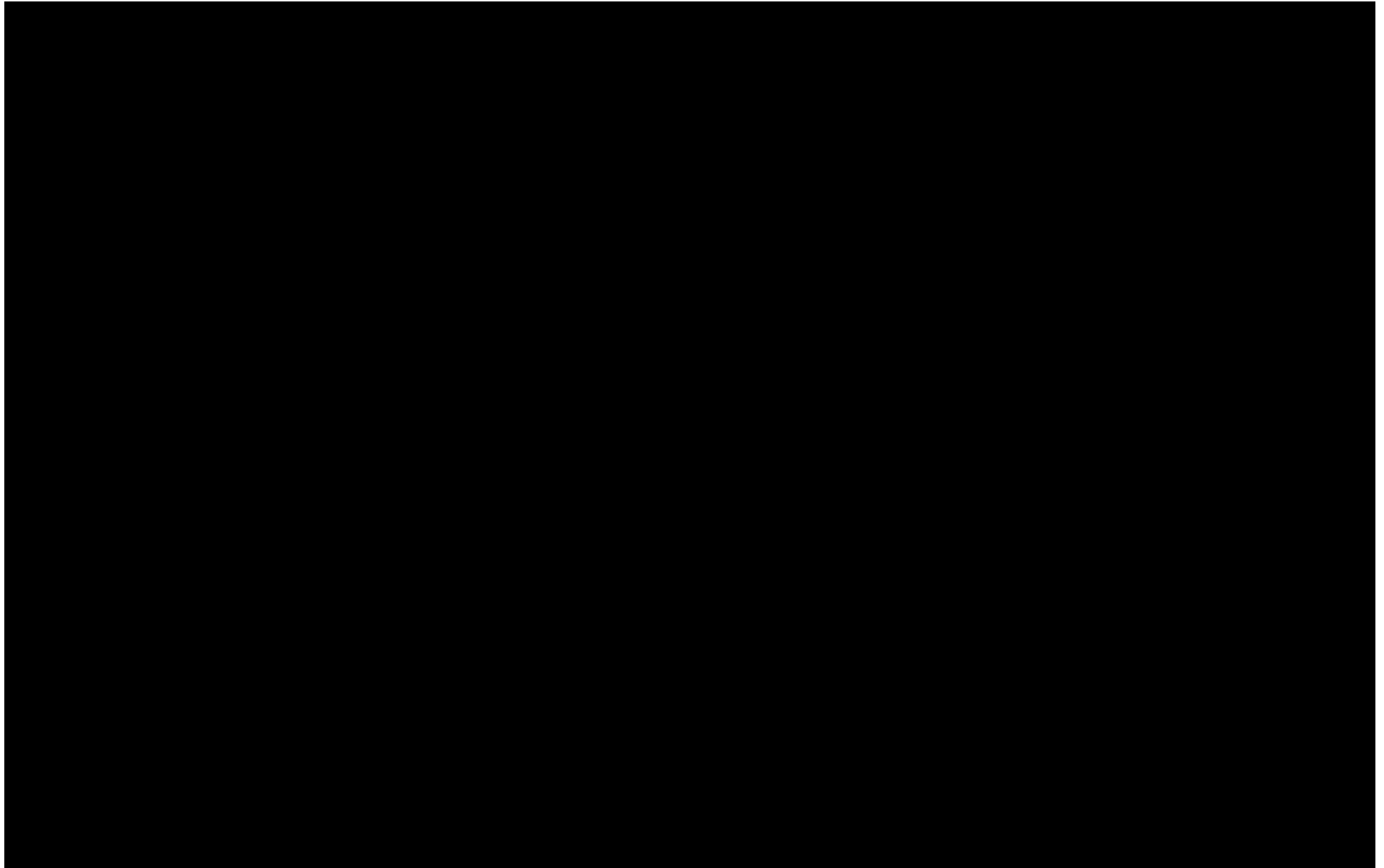


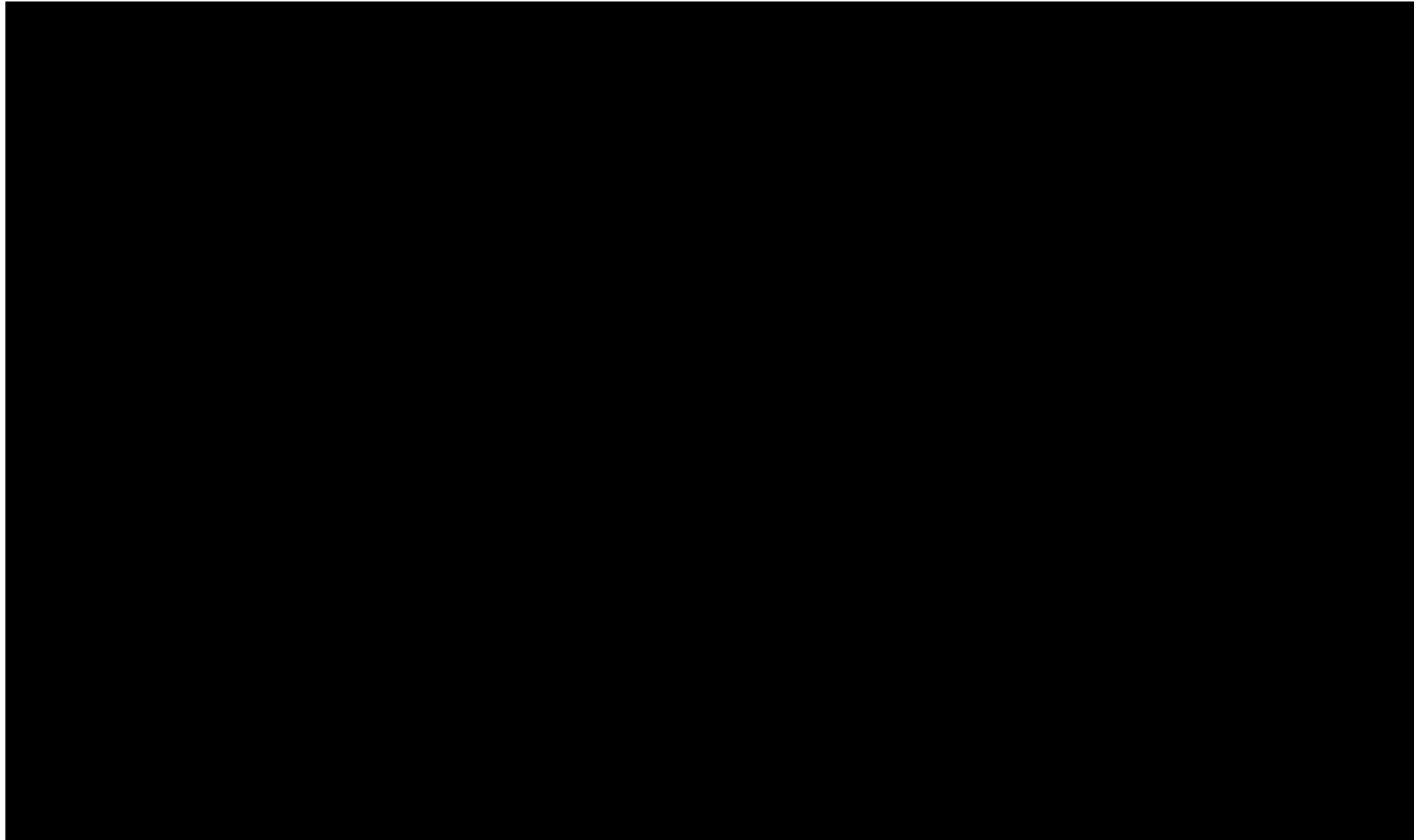


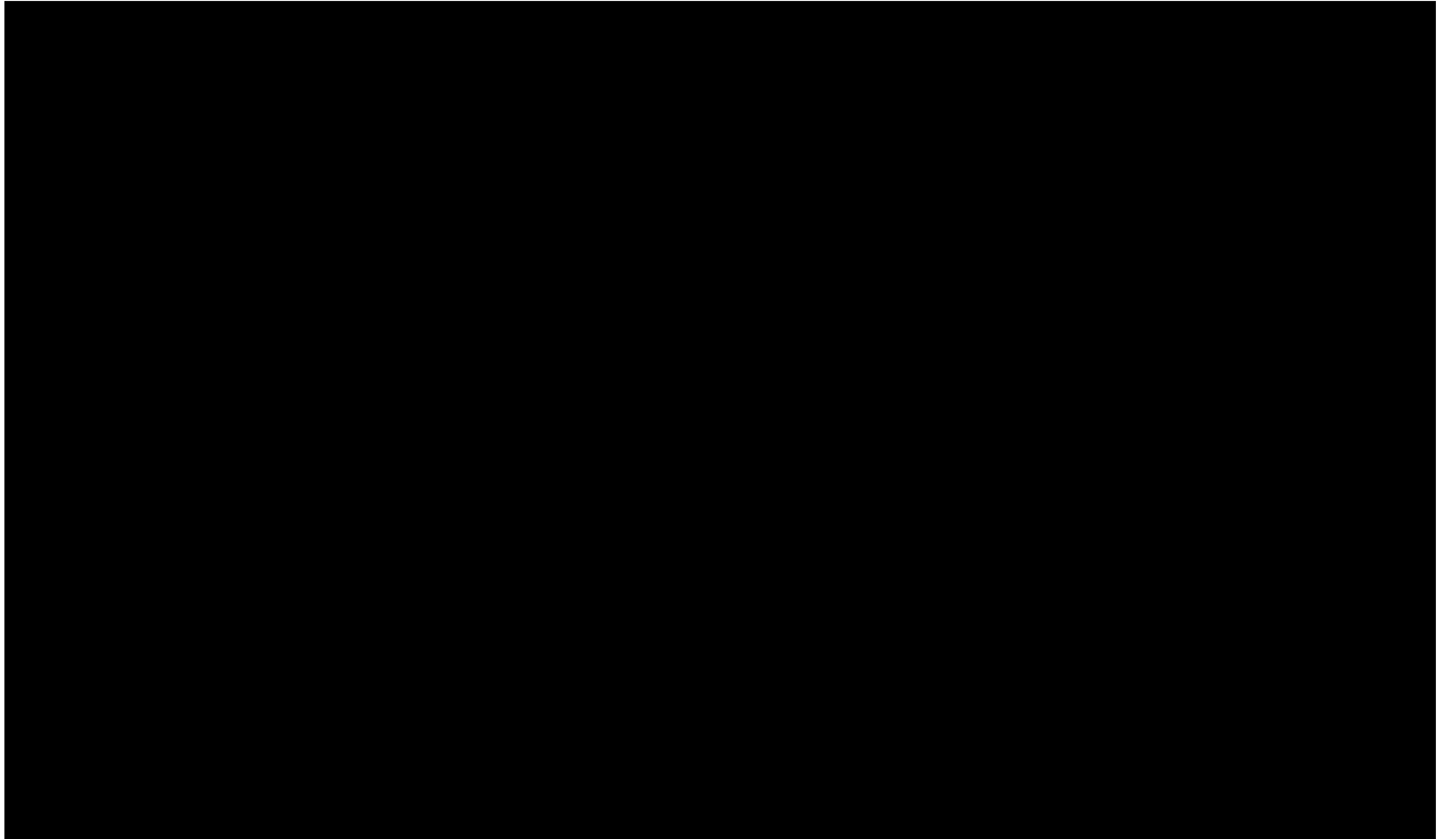




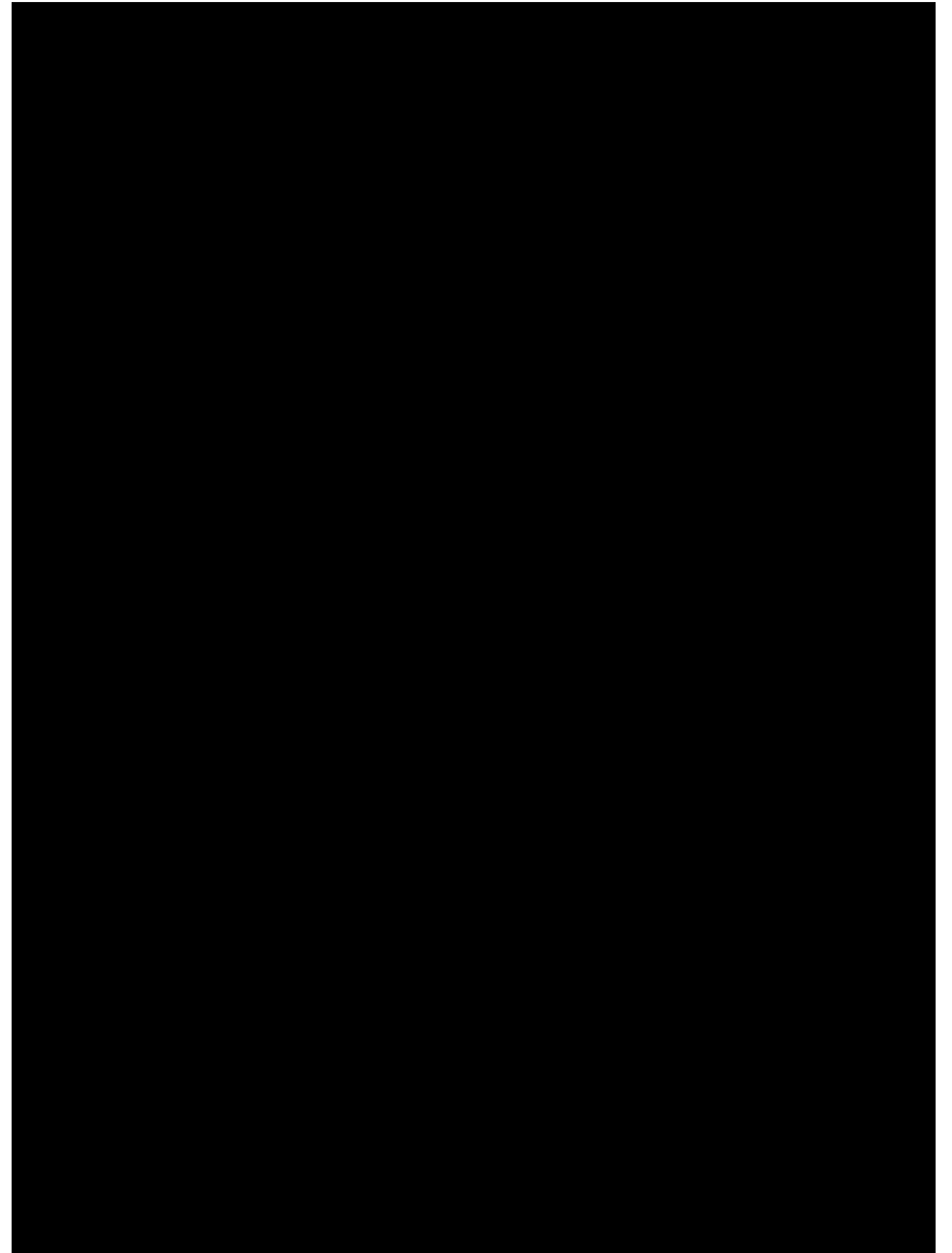
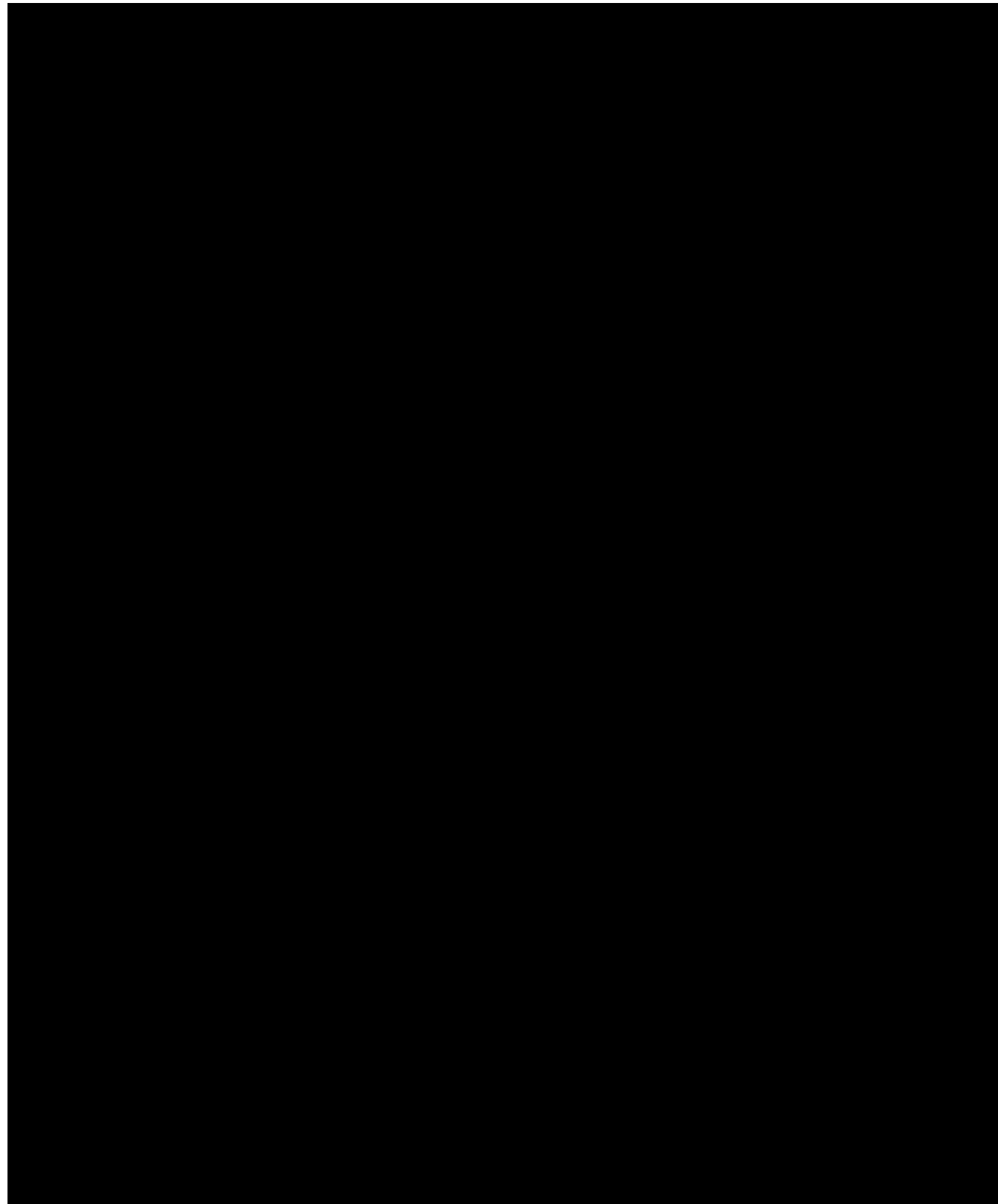




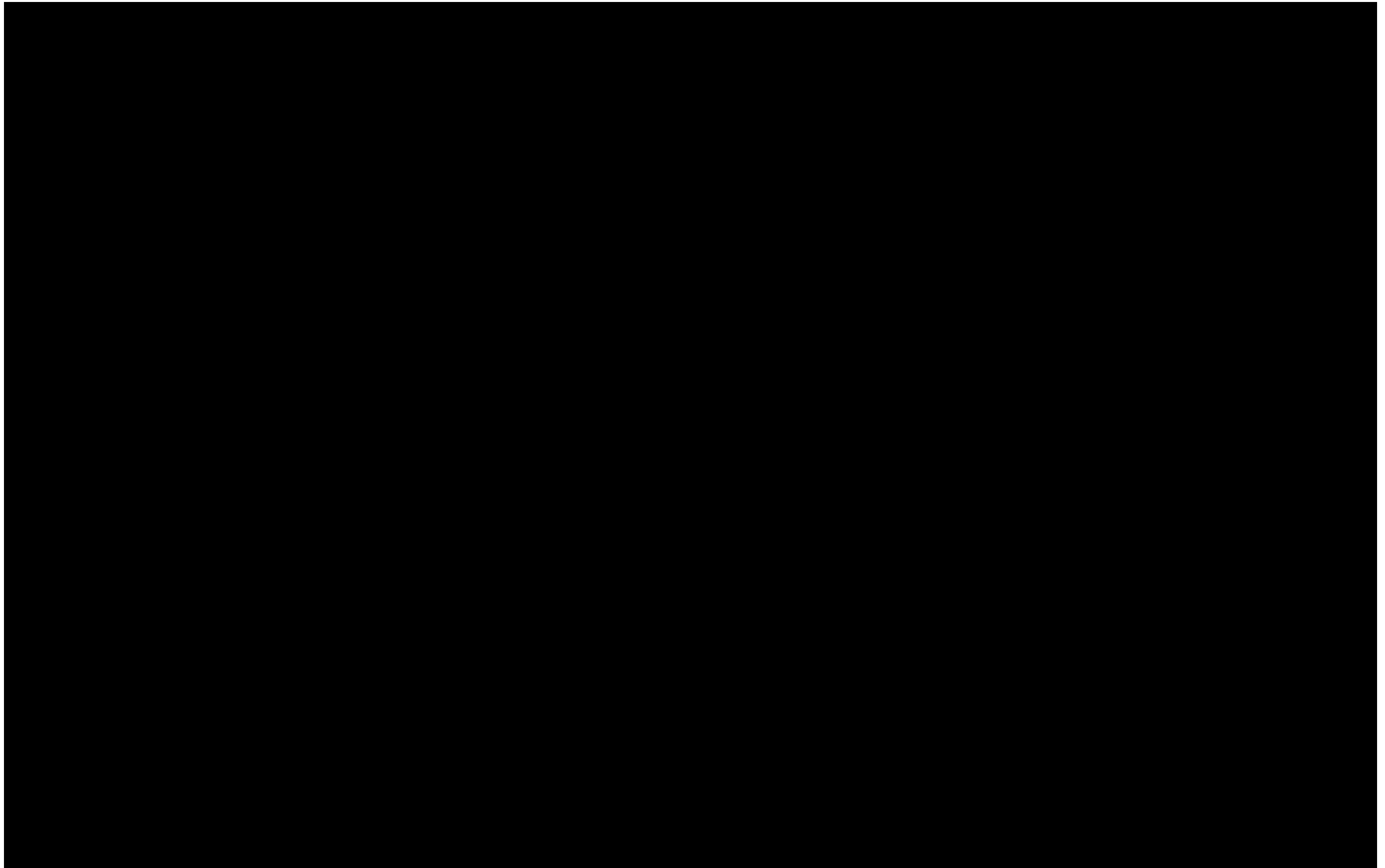




12 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE LAS ALTERNATIVAS

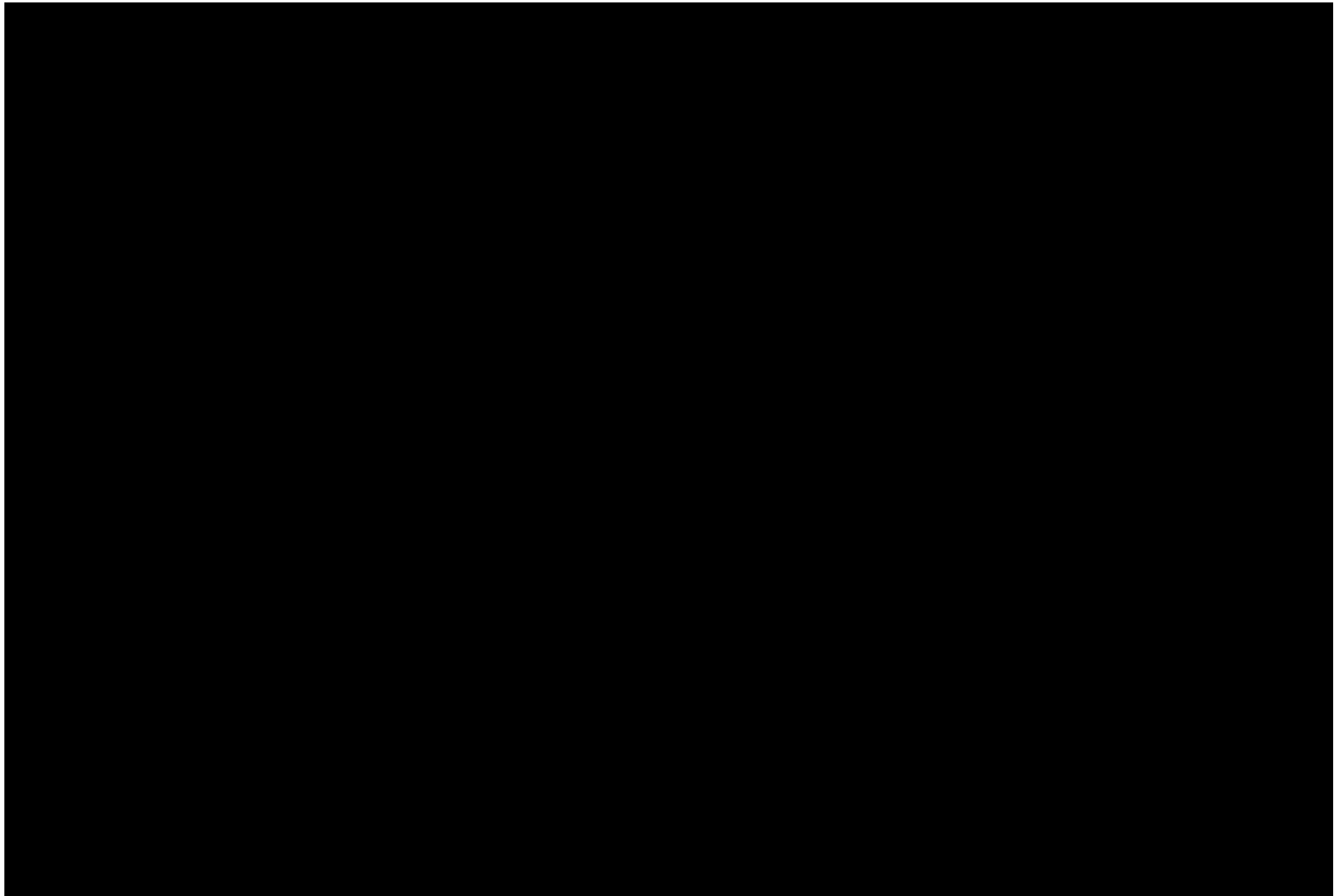


13 REUTILIZACIÓN DE MATERIALES

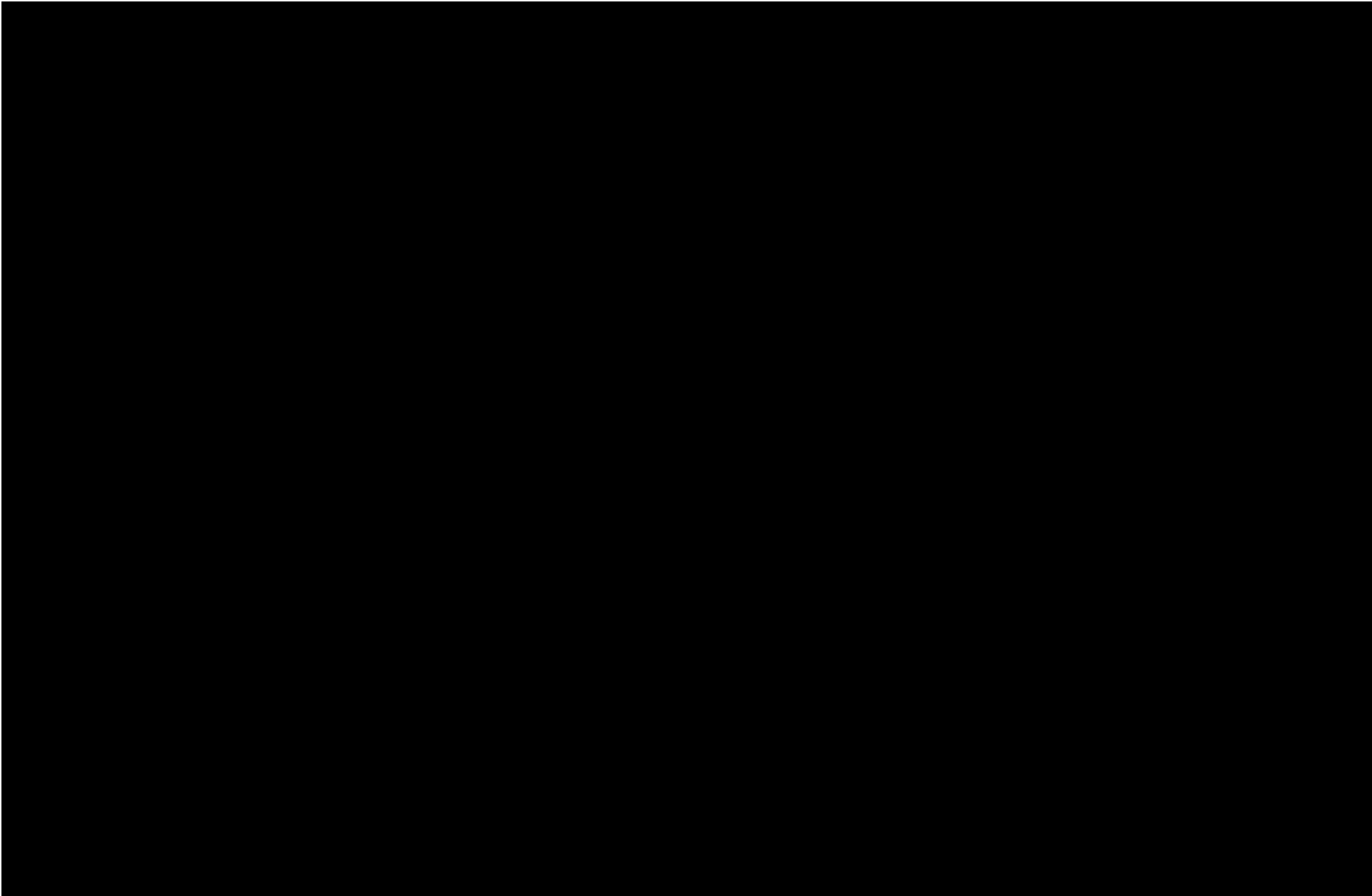


14 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE CÁLCULO

15 CIMENTACIÓN PROFUNDA DE LAS PANTALLAS



16 PERMEABILIDAD DEL TERRENO



APÉNDICES

APÉNDICE 1. PLANTA GEOLÓGICA 1:2000

APÉNDICE 2. PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE LAS ALTERNATIVAS EH 1:2000 EV 1:200

APÉNDICE 3. CAMPAÑA GEOTÉCNICA: REGISTRO DE SONDEOS

APÉNDICE 4. CAMPAÑA GEOTÉCNICA: REGISTRO ENSAYOS DE PENETRACIÓN DINÁMICA CONTINUA

APÉNDICE 5. CAMPAÑA GEOTÉCNICA: REGISTRO ENSAYOS LEFRANC

APÉNDICE 6. CAMPAÑA GEOTÉCNICA: REGISTRO ENSAYOS DE LABORATORIO

APÉNDICE 7. CAMPAÑA GEOTÉCNICA: GEOFÍSICA

